DOC

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

JR Document Public

SIMULATION GLOBALE DE BASSINS HYDROLOGIQUES

INTRODUCTION A LA MODÉLISATION

ET

DESCRIPTION DU MODÈLE GARDENIA

B.R.G.M.
15. MAR. 1985
BIBLIOTHÈQUE

Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

84 SGN 337 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

Document Public

SIMULATION GLOBALE DE BASSINS HYDROLOGIQUES

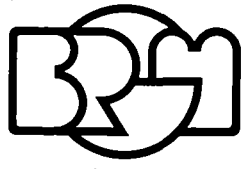
INTRODUCTION A LA MODÉLISATION

ET

DESCRIPTION DU MODÈLE GARDENIA

par

P.A. ROCHE, D. THIÉRY



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

Rapport du B.R.G.M.

84 SGN 337 EAU

Novembre 1984

Réalisation : Département Applications Graphiques

RESUME

Ce rapport est composé de deux parties quasi-indépendantes.

La première partie est une introduction à la modélisation des bassins hydrologiques avec un modèle global pluie-débit. Elle décrit le principe de fonctionnement des modèles, les données nécessaires, les applications possibles ainsi que les méthodes d'élaboration et de critique des données. Le principe du calage est expliqué, ainsi que les erreurs classiques à éviter et la manière de trouver un premier jeu de paramètres. La confiance à accorder aux résultats obtenus et aux termes du bilan est également discutée.

La deuxième partie est un mode d'emploi détaillé du modèle GARDENIA. Le modèle GARDENIA est un modèle global pluie-débit fonctionnant au choix au pas de temps journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, et prenant en compte la fonte de la neige. Il permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant ou à une source, ou bien un niveau piézométrique dans une nappe aquifère. Les données nécessaires pour utiliser le modèle sont :

- les précipitations sur le bassin versant,
- l'évapotranspiration potentielle,
- la température de l'air (éventuellement),
- les débits à l'exutoire du bassin (OU les niveaux aquifères) en un point.

Ce travail a été réalisé dans le cadre des travaux méthodologiques du département EAU, sur les fonds propres du B.R.G.M.

*
* *

S O M M A I R E

PREMIERE PARTIE - INTRODUCTION A LA MODELISATION 1

1. BUT DES MODELES - PRINCIPES D'UTILISATION 2
   1.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 2
   1.2. CALAGE 2
   1.3. APPLICATION A L'EXTENSION DE SERIES DE DEBITS D'UN BASSIN JAUGE 3
   1.4. APPLICATION AUX BASSINS NON JAUGES 4
   1.5. APPLICATION A LA PREVISION 4
   1.6. EXPLOITATION ULTERIEURE DE SERIES DE DEBIT 4

2. ELABORATION DE DONNEES 5
   2.1. DEMARCHES D'ENSEMBLE 5
   2.2. ANALYSE DES PLUIES 5
   2.3. ANALYSE DES EVAPOTRANSPIRATIONS 6
   2.4. ANALYSE DES DEBITS 7
   2.5. CONNAISSANCE DU BASSIN - PRECISION DES MESURES 8
      2.5.1. Les termes du bilan 8
      2.5.2. Précision et fiabilité des données 9

3. CALAGE D'UN MODELE 10
   3.1. PROCEDURE GENERALE 10
   3.2. QUELQUES ERREURS A EVITER 11
      3.2.1. Longueur de l'historique disponible et temps de mémoire du système 11
      3.2.2. Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux 12
      3.2.3. Confiance a accorder au calage 14
      3.2.4. Difficultés particulières aux simulations de niveaux piézométriques 16

DEUXIEME PARTIE - DESCRIPTION ET MODE D'EMPLOI DU MODELE GARDENIA 18

1. INTRODUCTION 19

2. DOMAINE D'APPLICATION DU MODELE 20

3. LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE 22

4. LES DONNEES "D'ENTREE" DU MODELE 23
4.1. LA LAME D'EAU 23
4.2. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP) 23
4.3. LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR 24

5. LE FONCTIONNEMENT DU MODELE 25
5.1. RESERVOIRS DU MODELE 25
5.2. FONCTION "PRODUCTION" ET FONCTION "TRANSFERT" 25
5.3. INITIALISATION 28

6. LE BILAN DANS LA RESERVE SUPERFICIELLE 29
6.1. APPORTS DE LA RESERVE SUPERFICIELLE 29
6.2. VIDANGE DE LA RESERVE SUPERFICIELLE 29

7. TRANSFERT DANS LES RESERVOIRS INTERMEDIAIRES ET SOUTERRAINS 30
7.1. LE RESERVOIR INTERMEDIAIRE 30
7.2. LE RESERVOIR SOUTERRAIN G1 31
7.3. LE RESERVOIR SOUTERRAIN LENT G2 31
7.4. RESERVOIR SOUTERRAIN UNIQUE G 32

8. LES SORTIES DU MODELE 33

9. CALAGE DU MODELE 35

10. LES PARAMETRES DU MODELE 38

11. MODE D'EMPLOI DU MODELE GARDENIA 40
11.1 DEFINITION DU NOMBRE ET DU CONTENU DES FICHIERS ET DE PARAMETRES 40
11.2 QUESTIONS PRELIMINAIRES POSEES PAR LE PROGRAMME 41

12. DESCRIPTION DU FICHIER DES PARAMETRES 44

13. LES FICHIERS DES DONNEES HYDROCLIMATIQUES 55

14. LES RESULTATS PRODUITS PAR LE MODELE 57

15. CONCLUSION 60

BIBLIOGRAPHIE 61

ANNEXES 62

ANNEXE 1 - Schéma de fonctionnement du modèle 63

ANNEXE 2 - Exemple d'application 69

ANNEXE 3 - Bordereaux de données 72

ANNEXE 4 - 5 exemples de jeux de paramètres 76

FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 1 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA 26

FIGURE 2 - Schéma de transferts simplifiés du modèle GARDENIA 27

FIGURE 3 - Fonte de la neige 34

FIGURE 4 - Fichiers pour le programme GARDENIA 42

TABLEAU 1 - Exemples de fichiers récapitulatifs :
TABLEAU.LST, MINMAXMOY.LST et MOYBILAN.LST 58

PREMIERE PARTIE

INTRODUCTION A LA MODELISATION

1. BUTS DES MODELES, PRINCIPES D'UTILISATION

1.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Un modèle hydrologique global simule par une succession de réservoirs, les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin-versant (pluie, évapo-transpiration, infiltration, écoulement).

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont régis par des lois simples, qui sont particulières à chaque bassin : ces lois sont résumées par les paramètres des modèles (réserve utile, temps de transfert, seuils de débordement, etc...). En raison du caractère global de cette schématisation et de la complexité du système hydrologique réel, ces paramètres ne peuvent être déduits a priori des caractéristiques physiographiques du bassin-versant (géologie, couverture végétale, etc...). Ils doivent donc être évalués :

- soit par transposition à partir de bassins-versants proches et de caractéristiques similaires ;
- soit par ajustement (calage) sur une série d'observations.

Dans les deux cas, il est donc nécessaire de procéder à un ou plusieurs calages des paramètres du modèle.

1.2. CALAGE

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte qu'ils permettent de calculer des débits aussi proches que possible des débits observés.

Les données nécessaires au calage sont :

- des séries ininterrompues des entrées du modèle : pluie et évapo-transpiration (éventuellement température, s'il y a de la neige) ;
- des séries d'observations des sorties du modèle (débits) non nécessairement continues, mais pour une période concomitante aux séries précédentes.

Le calage se fait par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux. A partir de ceux-ci, le modèle recherche un jeu fournissant des résultats meilleurs (par un algorithme d'optimisa-

tion non-linéaire). Il fournit à l'utilisateur :

- des bilans des différentes composantes de l'écoulement (ruissellement, écoulement souterrain, ...), telles que son schéma optimisé lui permet de les différencier ;
- une représentation graphique (console ou table traçante) permettant de comparer observations et simulations ;
- des critères numériques d'évaluation de la qualité de l'ajustement.

Muni de ces renseignements, l'utilisateur juge de la nécessité d'essayer une nouvelle optimisation à partir d'un jeu de paramètres qu'il est libre de modifier à sa guise.

Lorsqu'à la fois les critères numériques d'ajustement et les graphiques de comparaison visuelle sont satisfaisants, il peut considérer qu'il dispose d'un jeu de paramètres représentatif du bassin. Il peut alors, autour de cette solution, explorer diverses gammes de variations des paramètres, afin de déterminer la famille des paramètres représentant de façon acceptable à son point de vue, le cycle de l'eau (étude de sensibilité).

1.3. APPLICATION A L'EXTENSION DE SERIES DE DEBITS D'UN BASSIN JAUGE

L'application la plus fréquente de ce modèle ajusté est l'extension de données hydrométriques dans le temps. Ayant calé le modèle sur une courte série de débits (quelques années) et de pluies concomittantes, on utilise une série de pluies plus longue pour générer avec le modèle une série équivalente de débits.

La série de pluies utilisée peut être ou bien une série historique, ou bien une série générée par tirage au hasard, après avoir identifié la structure du processus statistique régissant ces pluies.

Pourquoi ne pas étendre directement les séries de débits à partir de leurs propres caractéristiques statistiques ? C'est essentiellement que le processus des pluies présente une mémoire très courte, contrairement aux débits. Il est donc pour un pas de temps mensuel par exemple, tout à fait licite dans la plupart des climats, de générer des pluies par des tirages au hasard indépendants dans les lois de distribution des pluies de chaque mois. En revanche, une telle procédure serait complètement erronée pour des débits.

1.4. APPLICATION AUX BASSINS NON JAUGES

L'utilisation de formules de transposition régionales pour évaluer les paramètres à utiliser pour un bassin non jaugé est une application à envisager avec prudence. Il est en effet nécessaire de disposer d'un large échantillon de calage sur des bassins de la même région.

1.5. APPLICATION A LA PREVISION

En simulant un certain nombre (une cinquantaine) de scénarios d'évolution à partir d'une date donnée, il est possible d'en effectuer des statistiques : cela conduit à une évaluation probabiliste des débits auxquels on peut s'attendre pour une durée de l'ordre de grandeur du temps de mémorisation du système hydrologique. A plus longue échéance, le dernier état observé n'a plus d'influence réelle sur ces débits. Pour les courtes échéances de prévision, les écarts entre la simulation et les observations aux derniers pas de temps doivent être réduits par une procédure de simulation adaptative qui les corrige plus ou moins d'après l'analyse de la structure de ces écarts (c'est le rôle du programme CREATADA).

1.6. EXPLOITATION ULTERIEURE DE SERIES DE DEBITS

Les séries de débit générées par un modèle peuvent ensuite être utilisées :

- pour dimensionner des micro-centrales ou des barrages-réservoirs par la simulation de la gestion de ceux-ci en temps réel sur une série chronologique,
- pour mettre au point un système de gestion de ces équipements (en utilisant les possibilités de prévision en temps réel pour améliorer les performances de la gestion),
- pour évaluer les ressources en eau disponibles en cas de sécheresse d'occurence rare (alimentation en eau potable, irrigation, etc...).

2. ELABORATION DES DONNEES

2.1. DEMARCHES D'ENSEMBLE

Les données d'entrée des modèles sont :

- les lames d'eau (pluie sur le bassin versant) ;
- les évapo-transpirations potentielles (abrégées ETP) ;
- les débits mesurés (pour le calage) à l'exutoire (ou les niveaux aquifères en un point).

Ces données doivent être critiquées et élaborées à partir d'informations fournies par des mesures ponctuelles, souvent incomplètes, c'est à dire que cette phase préliminaire est essentielle. Pour la mener à bien, on dispose des outils suivants :

- représentations graphiques : programmes GRECO, GRECAN,
- cartographie : programmes INGRID, LUCAS,
- conversions de pas de temps : programmes MOYSOM (journalier et mensuel) et TRANSDON (journalier, pentadaire, décadaire et mensuel),
- analyse de la structure des séries et génération de nouvelles séries : programmes ANGELINA (journalier) et MOINOR (mensuel),
- régressions multiples : programme REMULUS,
- analyse en composantes principales : programme ANACOMP,
- formules de TURC mensuelles pour le calcul de l'évapo-transpiration à partir de données d'insolation, de température et d'humidité relative (si elle est inférieure à 50 % certains mois) : programme ETPTURC,
- sélection de postes sur un bassin ou proches : programme SELECPLU,
- pondération de postes pluviométriques ou climatiques pour calculer une lame d'eau ou d'ETP : programme PONDERPLU.

Tous ces programmes sont adaptés en conversationnel sur l'ordinateur VAX du B.R.G.M. Ils peuvent également être implantés sur des micro-ordinateurs.

2.2. ANALYSE DES PLUIES

Plusieurs types d'analyse des données existantes sont possibles. Nous distinguerons deux cas :

* *Etude rapide d'un bassin* (pas de temps mensuel pour toutes les données)
  1. Recueillir plusieurs séries de pluies et de débit.
  2. Dessiner chaque série.
  3. Repérer les périodes concomitantes de données.
  4. Choisir une pondération et calculer la lame d'eau pour la période la plus longue possible.
  5. Compléter la série de la lame par régression multiple.
  6. Calculer les ETP en utilisant si nécessaire une série de moyennes mensuelles inter-annuelles.

* *Etude très détaillée d'un bassin* (pas de temps mensuel pour toutes les données)
  1. Recueillir des séries nombreuses de pluies dépassant assez largement les limites du bassin-versant.
  2. Dessiner les séries et repérer les périodes concomittantes.
  3. Faire une analyse en composantes principales. Repérer les données et les stations s'écartant le plus du comportement général. Corriger éventuellement le fichier et refaire l'analyse.
  4. Cartographier différentes variables (pluies moyennes inter-annuelles, composantes principales).
  5. Rechercher d'éventuelles liaisons altitude-pluie. Mettre au point des méthodes de correction.
  6. Affecter suivant plusieurs règles et plusieurs pondérations, les postes pluviométriques au bassin-versant. Comparer les lames d'eau ainsi calculées. Estimer la précision de l'évaluation.

REMARQUE. Une étude régionale ne se distingue pas dans sa démarche de l'étude précédente. Néanmoins, il est commode de disposer de fichiers contenant les coordonnées des stations pluviométriques et de réaliser un maillage régulier permettant de localiser et de cartographier les différents bassins-versants étudiés. Des procédures automatiques d'attribution des postes pluviométriques aux bassins-versants permettent alors d'alléger considérablement les manipulations ultérieures (programmes SELECPLU et PONDERLU).

2.3. ANALYSE DES EVAPO-TRANSPIRATIONS (ETP)

Il n'est pas question, dans la majeure partie des études, de réaliser une étude fine de l'évapo-transpiration. Les données disponibles sont trop peu nombreuses, les fluctuations climatiques sont trop faibles vis-à-vis des incer-

titudes pesant sur la pluie et sur le schéma hydrologique pour que l'on s'attarde à une discussion exhaustive des différentes mesures et méthodes de calcul. Il s'agit pour les modèles utilisés ultérieurement, de disposer d'un indice présentant les variations saisonnières principales du phénomène. Si possible, on utilise les données de température et de durée d'insolation pour lui donner des fluctuations climatiques raisonnables : la formule mensuelle de TURC est alors amplement suffisante. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit qu'il ne s'agit là que d'un indicateur : des écarts de l'ordre de 20 % en moyenne sont tout à fait possibles. De tels écarts existent entre évaluations réalisées avec des méthodes différentes : formule de PENMAN, de BROCHET. Les données d'évaporomètres peuvent également servir d'indicateur (bac Colorado de classe A, etc...). On prendra soin cependant de ne pas mélanger dans une même série des données de différentes provenances : elles ne sont généralement pas comparables.

On pourra éventuellement utiliser après évaluation des ETP par la formule mensuelle de TURC, les facteurs culturaux définissant l'évaporation maximale à un stade végétatif donné pour différentes cultures. Néanmoins, la complexité à l'échelle du bassin-versant est telle qu'il ne semble pas nécessaire d'utiliser de tels facteurs de correction.

Dans de nombreux cas, on se contente même d'une évaluation d'évapotranspiration moyenne pour chaque mois. De telles données sont accessibles dans des atlas (Météorologie Nationale).

2.4. ANALYSE DES DEBITS

Si pour les données d'entrée, il est nécessaire de disposer d'un historique continu de données au même pas de temps, pour les sorties du modèle (données de débit ou de niveau de nappe, il est possible d'utiliser des données présentant des lacunes. Il serait même dangereux d'utiliser une quelconque méthode de reconstitution des données manquantes pour calculer des valeurs supplémentaires qui serviraient au calage. Dans la majeure partie des cas, on ne procède pas à une analyse préalable des débits observés. Il est bon toutefois de représenter sur un même graphique à différents pas de temps si possible, les pluies et les débits avant d'entreprendre une simulation : des évènements particuliers peuvent alors être notés : débits exceptionnels non précédés de pluies, et épisodes pluvieaux notables n'ayant pas contribué à l'écoulement. Dans de nombreux cas, des erreurs de reports et de saisie des

données peuvent ainsi être détectées avec tout calcul. C'est autant de gagné pour la phase de calage du modèle où la comparaison des simulations et des observations peut également servir à cette critique.

Lorsqu'on dispose de plusieurs séries de débit dans des stations relativement proches, il peut être intéressant d'étudier les similarités de comportement de ces séries par une approche statistique du même type que celle utilisée pour les pluies. Mais il semble inutile de consacrer trop de temps à ces préliminaires, car l'analyse sera largement facilitée par les simulations des modèles.

En revanche, il est indispensable avant toute simulation d'acquérir une connaissance de base sur le bassin-versant étudié.

2.5. CONNAISSANCE DU BASSIN - PRECISION DES MESURES

2.5.1. Les termes du bilan

Les modèles utilisés sont des modèles de bilan des entrées et des sorties d'eau à l'échelle du bassin-versant contrôlé par une station de jaugeage.

Il faut bien concevoir que ce bilan n'a de sens que si l'on peut négliger les flux non pris en compte. On s'attachera donc à évaluer :

- si la structure hydrogéologique est susceptible d'entraîner des échanges importants avec l'extérieur du bassin-versant en dehors de l'exutoire (échanges latéraux ou "sous" la section de jaugeage) ;
- si des interventions humaines (canaux, dérivations, prélèvements restitués hors du bassin, etc...) ne modifient pas significativement les termes de ce bilan.

Une enquête sommaire préalable auprès de la D.D.E. ou de la D.D.A., voire l'Agence de Bassin, est nécessaire.

Les modèles utilisés sont adaptés à l'étude de bassins dont le bilan est affecté par de tels phénomènes, par un jeu de paramètres descriptifs, qu'on peut laisser libres de s'optimiser tout seul (surface d'un bassin karstique dont on contrôle quelques exutoires, débit de base d'importation ou d'exportation, etc...).

Ces termes ne doivent être étudiés qu'avec prudence, et uniquement si l'on a de bonnes raisons de le faire. Cependant, on remarque parfois que des échanges qu'on évalue intuitivement au début de l'étude, doivent être remis en cause (des modèles plus élaborés : CREAMUL, KARINE permettent de prendre en compte des influences extérieures dans des cas particuliers).

2.5.2. Précision et fiabilité des données

Les données de débits dont on dispose, sont rarement des estimations précises du débit réellement écoulé, et cela tout particulièrement dans les extrêmes de la gamme de variation (étiages et crues). Les courbes de tarage (relation hauteur-débit dans la plupart des cas, relation pente et hauteur-débit pour les rivières canalisées) sont de qualité variable, et ne sont pas stables dans le temps. Les méthodes utilisées par les services hydrométriques ne sont pas homogènes. Tous ou presque pratiquent lors de l'élaboration des données, des corrections :

- correction saisonnière pour les rivières enherbées (chapeau de gendarme) ;
- correction progressive des courbes de tarages (dont certaines méthodes catastrophiques comme celle dite du "yoyo" qui consiste à modifier à chaque jaugeage la courbe de tarage).

Enfin, des particularités hydrauliques rendent les relations douteuses :

- influence à l'aval : bras de dérivation avec un moulin, affluents, etc...,
- battements dans des coudes de rivières,
- contrôle hydraulique variable.

Les services gestionnaires des réseaux de mesures connaissent bien la qualité des données qu'ils ont élaborés : il est indispensable de les consulter dès le début de l'étude pour connaître ces particularités, les dates de détarage dues à des travaux, etc...

Cependant, il faut bien utiliser ce dont on dispose. Beaucoup de ces erreurs ne portant pas atteinte à l'évaluation des flux d'ensemble à l'échelle annuelle (le volume écoulé au dessus d'un très fort débit, par une crue mal ou non jaugée peut rester tout à fait négligeable au pas de temps mensuel).

De cette connaissance des difficultés hydrométriques, on retiendra dans chaque cas, une idée de ce qu'il est raisonnable d'attendre d'une simulation des débits par un modèle (il est inutile de s'attendre à un calage quasi-parfait si la qualité des données est douteuse).

3. CALAGE D'UN MODELE

3.1. PROCEDURE GENERALE

Le calage des modèles hydrologiques du B.R.G.M. se fait pas une procédure "semi-automatique". L'hydrologue juge de la qualité d'une simulation essentiellement sur des appréciations visuelles, et son jugement dépend du but qu'il s'est fixé, de l'appréciation de la fiabilité des données ; il contrôle le bilan des différents flux et juge de la vraisemblance des paramètres.

Le modèle, lui, recherche un jeu de paramètres qui lui permet d'améliorer, par rapport à un jeu d'essai fourni par l'utilisateur, un critère numérique de qualité de l'ajustement. Ce critère est éventuellement au choix de l'utilisateur : dans le modèle GARDENIA, celui-ci a par exemple la possibilité de donner un poids plus important aux plus faibles valeurs, afin de corriger l'impact prédominant des crues dans les écarts observés.

Néanmoins, quelle que soit sa validité, ces critères que le modèle optimise, ne peuvent prendre en compte l'ensemble des informations dont dispose l'hydrologue : le modèle n'est pas "calé" par une procédure automatique universelle. Il est calé par l'utilisateur, mettant à profit les performances numériques de l'ordinateur.

Ce calage se déroule donc naturellement en plusieurs étapes : l'utilisateur fournit un jeu de paramètres réaliste et décide quels paramètres il accepte de faire varier et dans quelles limites pour améliorer le critère d'ajustement qu'il a choisi. A l'issue d'un certain nombre d'essais (itérations de la procédure de calage), le modèle fournit une simulation et un jeu de paramètres qui donnent une meilleure valeur du critère d'ajustement choisi.

L'analyse de ces résultats comporte différents aspects.

- examen graphique : qualité de reconstitution et différentes composantes de l'écoulement identifiées ;
- analyse des bilans année par année ;
- examen des paramètres obtenus et de leur vraisemblance ;
- analyse des essais successifs par le modèle.

A l'issue de cet examen, l'utilisateur peut :

- intervenir sur des séries de données : un modèle est en effet un excellent outil d'analyse conjointe des données de pluies et de débits ;
- choisir un nouveau jeu de paramètres et modifier les options d'optimisation (paramètres à faire varier, contraintes sur les variations) ;
- changer le choix de modélisation : les modèles fournissent des simulations représentant le fonctionnement d'un schéma hydrologique donné. Il est tout à fait possible que le schéma choisi ne représente pas le fonctionnement réel de façon satisfaisante. On peut alors, en particulier avec le modèle GARDENIA, choisir de nouvelles options de schéma hydrologique (introduction d'un réservoir supplémentaire, d'un seuil, suppression d'une composante d'écoulement, intervention de la gestion d'un stock de la neige, etc...). Le choix d'un pas de temps de simulation différent peut également être envisagé (pour éviter des difficultés de calage dues à des temps de réponse très rapides que l'on ne souhaite pas retenir, ou au contraire pour rechercher dans une approche à pas de temps plus fin, une meilleure représentation des mécanismes).

A l'issue de ce travail, l'utilisateur fait réaliser au modèle de nouvelles simulations qui viendront confirmer (ou infirmer !) son analyse.

3.2. QUELQUES ERREURS A EVITER

Dans cette démarche, un certain nombre d'erreurs peuvent être évitées si l'on garde à l'esprit ce qu'on peut attendre d'un modèle. Les précautions qui suivent sont absolument essentielles.

3.2.1. Longueur de l'historique disponible et temps de mémoire du système

On ne peut pas identifier sur quelques mois de données des fluctuations inter-annuelles à longue période de retour. Pour identifier le fonctionnement d'un système, il faut en avoir observé plusieurs cycles. Si cinq ou six ans sont amplement suffisants pour un petit bassin à fort ruissellement, il faut dix à quinze années de mesures pour identifier des fluctuations piézométriques de longues périodes.

Cela ne signifie malheureusement pas que lorsqu'on ne dispose que de cinq ans de données, le système hydrologique n'a pas de longs temps de mémoire ! C'est simplement qu'il est illusoire de chercher à les identifier à l'aide d'un modèle, aussi élaboré soit-il. Si l'on est conduit à réaliser des extensions de données sur un tel bassin, il convient donc d'être extrêmement prudent quant aux valeurs obtenues.

Ce temps de mémoire nécessite par ailleurs que toute simulation d'années de calage soit précédée d'un nombre suffisant d'années de "démarrage" : il s'agit de monter progressivement en régime un système qui comporte des stocks importants. A la date du début des observations, il faut lui remplir ces réservoirs. Des procédures ont été mises au point pour limiter ces années de démarrage à un nombre raisonnable dans le modèle GARDENIA. On part alors d'un état qui correspond au régime permanent stationnaire du système, un peu comme on initialise un modèle transitoire par un modèle en permanent. Néanmoins, quelques années de démarrage réel restent nécessaires après la mise en régime permanent.

3.2.2. Interprétation des paramètres et choix des paramètres initiaux

Malgré les performances des méthodes de recherche utilisées par le modèle, le choix des paramètres initiaux est essentiel. Pour chaque modèle, nous fournissons un guide des valeurs les plus communément rencontrées.

Une difficulté tout à fait classique est l'association des noms de paramètres des modèles avec d'autres concepts. Lorsqu'on parle de réserve utile d'un modèle global, il ne s'agit en aucune façon de la réserve utile telle qu'elle est définie par les pédologues ou les agronomes sur une parcelle particulière. Il s'agit d'une réserve globale à l'échelle du bassin, d'un volume d'eau maximal disponible pour la reprise par évaporation. Trouver une réserve de 300 mm n'est pas une aberration en soi, même si l'on a de bonnes raisons d'évaluer la réserve agronomique à 80 mm.

En revanche, trouver une surface de bassin-versant de 50 km^2 pour un bassin dont on estime la surface à 35 km n'est pas acceptable : si l'on considère que l'on connaît bien la surface du bassin-versant (ce qui est très souvent le cas), il n'y a aucune raison à laisser ce paramètre libre, même si l'on obtient en le faisant une simulation plus satisfaisante (sauf dans quelques cas particuliers d'extension de données).

Le nombre des paramètres qu'on laisse libre doit être le plus faible possible : pour des simulations équivalentes, divers jeux de paramètres sont possibles pour des questions dimensionnelles : si l'on multiplie les pluies, les ETP, les seuils par un même facteur, on obtiendra une simulation identique pour une surface divisée par ce même facteur ; il est donc aberrant de modifier ces paramètres simultanément, d'autant plus qu'il est extrêmement rare qu'ils soient tous également incertains. La procédure à adopter pour le calage est en général la suivante :

- fixer les paramètres les mieux connus (surface, débit extérieur) et optimiser les autres ;
- libérer (sous contraintes) les paramètres fixés précédemment après un calage satisfaisant. Cette deuxième étape permet de prendre en compte le fait qu'aucun des paramètres n'est rigoureusement connu.

Dans le cas d'un bassin mal connu, on adoptera une démarche différente :

- estimer approximativement des paramètres relativement secondaires pour les ordres de grandeurs (temps de tarissements, seuils, etc...) ;
- laisser libre seulement un ou deux paramètres fondamentaux (surface pour un système karstiques, correction des pluies pour un bassin très montagneux, etc...) qui règlent les principaux ordres de grandeur du bassin et optimiser ;
- libérer progressivement les paramètres initiaux pour affiner le calage.

REMARQUE. Le fait d'optimiser des coefficients correcteurs des ordres de grandeur des différentes entrées (pluies, ETP) est commun à tous les modèles présentés ici. Cela peut surprendre. N'est-ce pas une solution de facilité que de "corriger" à son gré les données pour les faire cadrer avec un modèle théorique ?

Il est certain que l'on ne peut accepter des corrections très importantes sur chaque type de donnée sans remettre en cause ou bien leur validité en tant qu'indicateurs des phénomènes physiques réels, ou bien la validité des hypothèses de modélisation.

Cependant, l'élaboration des données d'entrée, nous l'avons vu, n'est pas une procédure rigoureuse et définitive : la représentativité des postes pluviométriques n'est pas acquise, la méthode d'interpolation peut être choisie de différentes façons, etc... Pour les ETP, la nature même du phénomène physique et des mesures dont on dispose montrent que celles-ci représentent correctement les fluctuations saisonnières du phénomène, mais

peuvent s'écarter de la réalité d'un facteur multiplicatif non négligeable (à la limite, on utilise parfois simplement un "indicateur" de l'ETP comme la température).

C'est pourquoi, dans des limites raisonnables, des corrections peuvent être envisagées pour rechercher l'équilibre du bilan. Ces corrections ne doivent cependant pas être faites mesure par mesure (car alors, on pourrait ajuster n'importe quel modèle), mais sur l'ensemble de l'historique (par une homothétie).

3.2.3. Confiance à accorder au calage

Comment décider qu'une simulation est "satisfaisante" ? Comment en déduire qu'il est acceptable d'utiliser les paramètres calés pour des extensions de données ?

Il est difficile de répondre à ces questions en toute généralité, d'autant que l'on ne peut jamais assurer la qualité des extrapolations d'une façon strictement déductive (et les exemples de surprise ne manquent pas, pour des raisons qui sont bien souvent explicables "a posteriori"). Néanmoins, quelques règles de bon usage sont nécessaires :

* *Durée des observations*.

Nous l'avons déjà dit, mais c'est fondamental. Il faut ajouter à cela qu'il est très souhaitable de disposer d'un historique de données correspondant à des situations variées. Un calage fait sur quelques années abondantes, risque de réserver des surprises en année sèche. Néanmoins, il faut insister sur le fait que la nature physique du bilan qui est effectué assure une stabilité importante des résultats pour les simulations de débit (cela n'est plus vrai pour les simulations de niveaux piézométriques). Les quinze dernières années en France fournissent un très intéressant échantillonnage de situations (avec l'avantage que les années sèches et abondantes forment des séquences qui ont conduit à des fluctuations de grande amplitude). Si l'on peut remonter à des données antérieures, la séquence des années 1940-1950 est également très intéressante de ce point de vue en France.

* *Identification du fonctionnement*.

Un modèle présentant des seuils peut tout à fait ne faire fonctionner ces seuils qu'une ou deux fois durant l'historique disponible. Ce sont

alors les données de ces dates qu'il convient d'examiner avec le plus grand soin. La précocité de la remontée des débits en début de saison humide ou en automne pour les climats tempérés est un bon indicateur de la qualité de fonctionnement de la partie superficielle : une réserve superficielle trop grande met trop de temps à se saturer et conduit à un retard bien visible. La réponse aux épisodes pluvieux isolés de l'étiage est également un très bon test de cette partie du modèle. Mais, il est fréquent que l'on ne puisse pas arriver à une description très satisfaisante : dans ce cas, une estimation de l'impact des erreurs que cela peut occasionner est utile. Elle montre souvent que ces périodes charnières ne jouent qu'un rôle marginal dans le bilan d'ensemble : le modèle est alors utilisable pour des évaluations de ressources, l'analyse du potentiel hydro-électrique, etc..., mais il faut noter que les statistiques de débit des mois concernés ne seront pas bien évaluées.

La séparation de l'écoulement entre ces différentes composantes doit être vérifiée graphiquement. Il faut faire attention à l'influence du pas de temps sur ces constantes de temps : des données mensuelles décroîtront en étiage avec des temps caractéristiques de l'ordre de 2 à 3 mois. Mais au pas de temps journalier, ce tarissement moyen apparaîtra comme la superposition de 2 composantes, l'une relativement rapide, l'autre plus lente. Là encore, de telles remarques ne mettent pas nécessairement en cause la fiabilité du modèle : tout dépend de l'utilisation. On notera en particulier qu'il est illusoire de croire mieux identifier le fonctionnement d'un bassin sur 3 ans de données journalières (environ 1000 valeurs) que sur 3 ans de données mensuelles (36 valeurs). Dans le premier cas, on identifie mieux les réactions rapides, mais les variations lentes sont souvent cachées par la variabilité des phénomènes rapides.

L'introduction du mécanisme de la neige présente les mêmes écueils : le stockage neigeux ne sera correctement identifié que s'il est observé plusieurs fois, et qu'il conduit à un effet sensible sur les débits des mois concernés.

La règle est donc qu'un modèle est ajusté quand toutes ses composantes ont fonctionné plusieurs fois en conduisant à des effets notables et corrects sur les simulations.

* *Interprétation du bilan.*

Un modèle n'est jamais au mieux qu'une représentation acceptable de la relation entre ses entrées et ses sorties. Il est donc toujours périlleux d'aller chercher dans son mécanisme interne un flux ou un stock particulier

et de l'identifier à un flux ou un stock physique du système. Le fait qu'il existe 300 mm dans un réservoir souterrain pour un bassin-versant de 100 km^2, ne doit pas être interprété en disant que les réserves souterraines représentent 30 millions de m^3.

En revanche, un modèle peut être un bon moyen d'évaluer les apports efficaces annuels. En effet, lorsque les temps de mémoire du système sont relativement brefs (peu de reports inter-annuels), les apports efficaces calculés par le modèle sont des données de débits corrigées des effets de report d'un mois ou d'une saison à l'autre. Flux unique entre les entrées et la sortie, ces apports efficaces sont correctement identifiés, à condition que le calage soit correct. Le risque en effet est que le modèle, auquel on aurait laissé le choix de la surface du bassin-versant, trouve un calage erroné : évaluant des pluies trop élevées (par exemple pour répondre correctement à des pointes de crues dans une phase de son fonctionnement), il adopte une réserve utile suffisante et corrige la trop grande abondance des apports par une réduction de la surface du bassin si le volume global au niveau du bassin est respecté, l'apport efficace par unité de surface du bassin est erroné.

3.2.4. Difficultés particulières aux simulations de niveaux piézométriques

Les modèles du B.R.G.M. sont conçus pour simuler indifféremment des débits ou des niveaux piézométriques : en effet, le schéma hydrologique est le même, le niveau dans le réservoir souterrain pouvant être conçu comme lié au niveau piézométrique par une relation linéaire quel que soit le type du système aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement joue alors le rôle d'amplitude, comme la surface du bassin-versant dans le cas d'un calcul de débit.

Néanmoins, les simulations de niveaux posent quelques difficultés particulières :

* *Le coefficient d'emmagasinement n'est pas connu,* même en ordre de grandeur, comme l'est généralement la surface.

  En effet, il s'agit d'un coefficient d'influence globale des fluctuations de stock sur un niveau piézométrique particulier. Ce coefficient d'influence ne serait égal au coefficient d'emmagasinement moyen de la nappe

que si le point d'observation est situé loin de tout cours d'eau. Ce coefficient ne peut donc pas être relié aisément à des interprétations de pompages d'essai dont la validité reste locale (et par ailleurs le coefficient d'emmagasinement au sens traditionnel, n'est pas souvent défini à 20 % près, alors que des écarts de 20 % dans le bilan sont difficilement acceptables).

Dans le cas des simulations de niveau, le bilan qui est réalisé ne doit donc être interprété comme une analyse de flux qu'avec d'extrêmes précautions. Bien que ce soit une méthode d'analyse un peu dangereuse des apports efficaces, c'est souvent la seule disponible et il ne convient pas de la rejeter a priori.

* *Des temps de mémoire très longs* sont fréquents. Les difficultés de leur identification sont dont plus importantes que pour les débits. Ces temps retentissent sur les autres paramètres (niveau de base et coefficient d'emmagasinement en particulier).

DEUXIEME PARTIE

DESCRIPTION ET MODE D'EMPLOI DU MODELE GARDENIA

1. INTRODUCTION

Le département EAU du B.R.G.M. dispose déjà depuis un certain nombre d'années de modèles globaux de simulation pluie-débit ou pluie-niveau. Ces modèles globaux représentent le cycle de l'eau depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ces modèles sont globaux, car ils considère une "entrée" globale (une "lame d'eau" sur le bassin et une évapo-transpiration potentielle) et une "sortie" unique (qui est, suivant le cas, le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point). Ces modèles simulent le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premiers centimètres du sol dans lesquels se produit l'évapotranspiration,
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide,
- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement souterrain.

Les modèles globaux disponibles à ce jour étaient :

- le modèle AMANDE (rapport 80 SGN 192 HYD) fonctionnant au pas de temps journalier, suivant un algorithme assez compliqué, mais ne prenant pas en compte la fonte de la neige,
- le modèle CREATURE fonctionnant au pas de temps mensuel avec un pas de temps extrêmement simple (sans prise en compte de la neige),
- le modèle CREANEIGE (description et mode d'emploi - Recyclage d'hydrologie en septembre 1983), fonctionnant également au pas de temps mensuel avec un algorithme plus élaboré et surtout la prise en compte de la neige.

Il est donc apparu nécessaire de disposer d'un modèle unique ayant un algorithme relativement élaboré mais pas trop (pour rester fiable et robuste) fonctionnant aussi bien au pas de temps journalier qu'au pas de temps mensuel, pentadaire* ou décadaire* et prenant en compte la fonte de la neige. C'est ce que réalise le modèle GARDENIA**.

---

* On appelle pentade une série de 5 jours, et décade une série de 10 jours.

**Ce modèle a été réalisé avec la participation de Colette SALY, de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier).

2. DOMAINES D'APPLICATION DU MODELE

Le modèle GARDENIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des NIveaux Aquifères) est un modèle global qui permet de calculer :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) à partir de la séquence des précipitations sur son bassin d'alimentation,
- le niveau en un point unique d'une nappe à partir également des précipitations.

Pour utiliser le modèle GARDENIA, il faut disposer d'une série d'observations. En effet, les paramètres globaux ne peuvent pas être mesurés sur le terrain, mais doivent être calés par approximations successives de façon à reproduire le mieux possible ces observations.

Le modèle GARDENIA est exploité de façon courante pour l'extension de données, tant dans l'espace que dans le temps :

- génération de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calage préalable sur une période relativement courte ;
- étude des relations entre les paramètres du modèle et les facteurs physiographiques décrivant le bassin-versant ;
- transposition à des bassins-versants non jaugés.

Dans la pratique, il permet de dimensionner différents types d'ouvrages (digues, barrages) ou d'aménagements (champs de captage, micro-centrales électriques), d'analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant, de réaliser des prévisions en temps réel, etc...

En effet, le modèle une fois calé est en mesure :

- de reconstituer pour un bassin versant donné, les débits d'une rivière ou d'une source, ou le niveau piézométrique d'une nappe, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures ;
- de simuler au choix :
  . des débits résultant de précipitations exceptionnelles (dimensionnement d'ouvrages de crues) ou de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrages) ;

. des niveaux piézométriques de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations possibles pour les mois futurs.

Il offre en plus la possibilité d'analyser d'une part les différents termes d'un cycle hydrologique (infiltration, évapo-transpiration, écoulement), d'autre part les différentes composantes d'un écoulement (rapide, lent et très lent) dont il propose une décomposition.

Implanté sur l'ordinateur VAX du B.R.G.M., il est adaptable, par son écriture en FORTRAN standard, à tout autre ordinateur de capacité suffisante, muni d'un compilateur de FORTRAN IV ou 77.

Le pas de temps des calculs peut être au choix : journalier, pentadaire ou mensuel ; le choix du pas de temps mensuel permet en particulier de mettre le modèle à la portée de nombreuses études, par la facilité d'analyse et de critique des données et le faible coût du traitement informatique (économie de temps et de place en mémoire). Pour une étude plus fine, ou après un premier dégrossissage, on pourra utiliser un pas de temps plus fin (1 jour ou 5 jours par exemple).

Enfin, ce programme est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs cas, avec des options communes pour ces cas. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté pour les synthèses régionales où l'on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins-versants.

3. LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE

Le modèle GARDENIA fait intervenir un nombre maximal de huit paramètres "hydrologiques" (capacité de réserves superficielles, temps de tarissement, coefficient sur les pluies...).

Pour ajuster le modèle, il faut disposer des données suivantes :

- une série de précipitations (pluies) (continue),
- une série d'évapotranspiration potentielle (ETP) (continue), qui peut être calculée à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air (et éventuellement d'humidité relative),
- une série continue de température de l'air (uniquement pour prendre en compte la fonte de la neige),
- une série (pas forcément continue) de débits à l'exutoire du bassin ou de niveaux en un piézomètre.

Ces trois (ou quatre) séries doivent être disponibles sur la même période d'observations, et il est bon de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins un an avant les mesures de débit (pour faciliter l'initialisation du modèle).

4. LES DONNEES "D'ENTREE" DU MODELE

Le bassin versant est considéré comme une entité caractérisée pour chaque pas de temps par des données globales suivantes :

- une lame d'eau (en mm),
- une évapotranspiration potentielle (en mm),
- une température de l'air, uniquement pour la fonte des neiges (en °C).

4.1. LA LAME D'EAU

La lame d'eau sur le pas de temps est une moyenne pondérée des précipitations des différents postes pluviométriques relatifs au bassin versant. Il est nécessaire d'effectuer au préalable une critique des données permettant la reconstitution des données brutes manquantes s'il y en a.

La lame d'eau se calcule par une des méthodes d'interpolation suivantes :

- moyenne arithmétique,
- polygones de Thiessen,
- autres pondérations arbitraires (avec ou sans correction des différences d'altitude),
- analyse en composantes principales,
- kriegeage.

Si plusieurs postes sont disponibles, il est conseillé de les utiliser tous, pour l'analyse et la critique des données. Ensuite, on choisira un système de pondération qui réduira l'influence des erreurs aléatoires pouvant affecter certains postes;

4.2. L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

La valeur utilisée est généralement celle qui est calculée par la formule mensuelle de TURC à partir des données d'insolation, de température et éventuellement d'humidité. Toute autre méthode de calcul peut bien entendu être utilisée (Thorntwaite, Penman, etc...).

Des mesures sur le terrain, réalisées à l'aide de bacs ou d'évapomètres sont parfois disponibles, mais rarement détaillées. Elles nécessitent d'être analysées avant exploitation.

Si l'on ne possède aucune donnée susceptible de fournir l'ETP pendant la période d'observation, on peut éventuellement utiliser les moyennes inter-annuelles de chaque mois sans commettre d'erreurs trop importantes (comparativement aux incertitudes portant sur l'évaluation des lames d'eau).

4.3. TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR

On utilisera généralement la valeur moyenne définie comme la moyenne des températures minimales et maximales (de chaque jour ou de chaque mois).

Comme pour les précipitations, on sera parfois amené à pondérer les données de plusieurs postes. Il sera souvent nécessaire de corriger ces températures pour tenir compte des différences d'altitude entre le bassin et les postes de mesure.

*
* *

Toutes les données "d'entrée" doivent être continues, c'est-à-dire ne comporter aucune donnée manquante. Ces données peuvent être échantillonnées suivant un des pas de temps suivants :

- 1 jour,
- 1 pentade : 365/72 jours
- 1 décade : 365/36 jours = 2 pentades
- 1 "mois" : 365/30 jours = 3 décades = 6 pentades

NOTA. Le programme de calcul TRANSDON permet de calculer des données pentadaires, décadaires ou mensuelles à pas de temps égaux.

Chaque type de donnée peut être choisi à un pas de temps différent, mais les pluies doivent être au pas de temps le plus fin. Par exemple, on peut imaginer le cas suivant :

- pluies journalières,
- évapotranspirations potentielles mensuelles,
- débits observés pentadaires.

Le pas de temps de calcul sera le pas de temps le plus fin, c'est-à-dire celui de la pluie.

5. LE FONCTIONNEMENT DU MODELE

L'allure exponentielle du tarissement des débits de rivières et des niveaux des nappes souterraines rappelle celle de la vidange d'un réservoir.

Le comportement d'un système aquifère peut donc être représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres.

Des fonctions de transferts non linéaires sont de plus introduites pour permettre de corriger cette approximation un peu simpliste.

5.1. RESERVOIRS DU MODELE

Le modèle GARDENIA comprend au maximum 4 réservoirs, cependant par l'intermédiaire des paramètres (et des options), il est possible d'utiliser un schéma simplifié ne faisant intervenir que 2 ou 3 réservoirs. Le schéma des réservoirs est précisé sur les figures 1 et 2.

Le modèle réalise en fait un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évapotranspiration) pour chacun des pas de calcul.

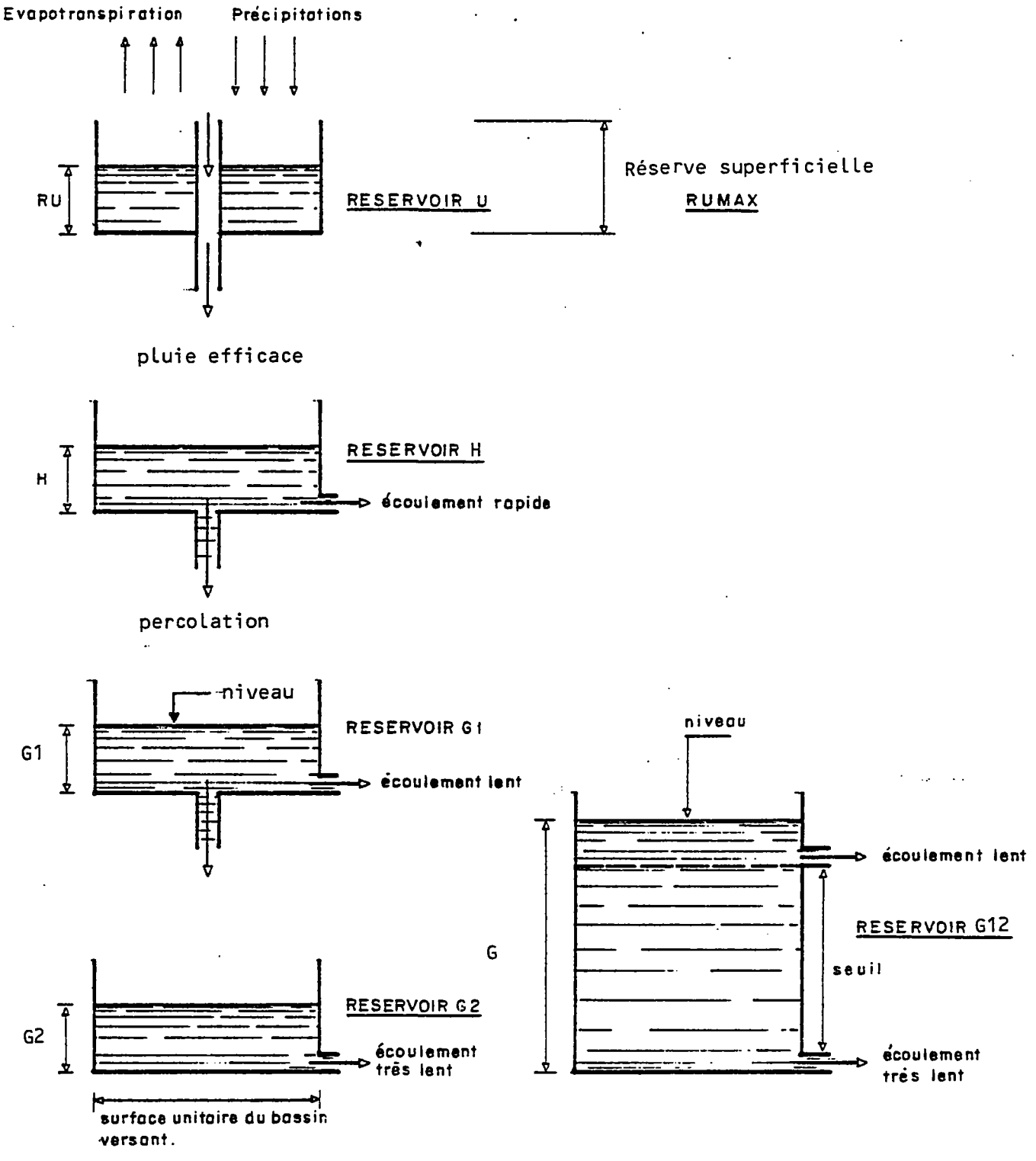
5.2. FONCTION "PRODUCTION" ET FONCTION "TRANSFERT"

Le calcul comporte deux parties traditionnellement appelées : fonction "Production", et fonction "Transfert".

La fonction "Production" détermine quelle quantité d'eau sera apportée au modèle et quelle quantité sera évaporée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir "plus tard".

La fonction "Transfert" détermine à quel moment l'eau qui n'a pas été évapotranspirée, ressortira à l'exutoire du bassin ou arrivera à la nappe. Le transfert s'effectue par passage à travers les 2 ou 3 réservoirs inférieurs du modèle.

FIGURE 1 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA



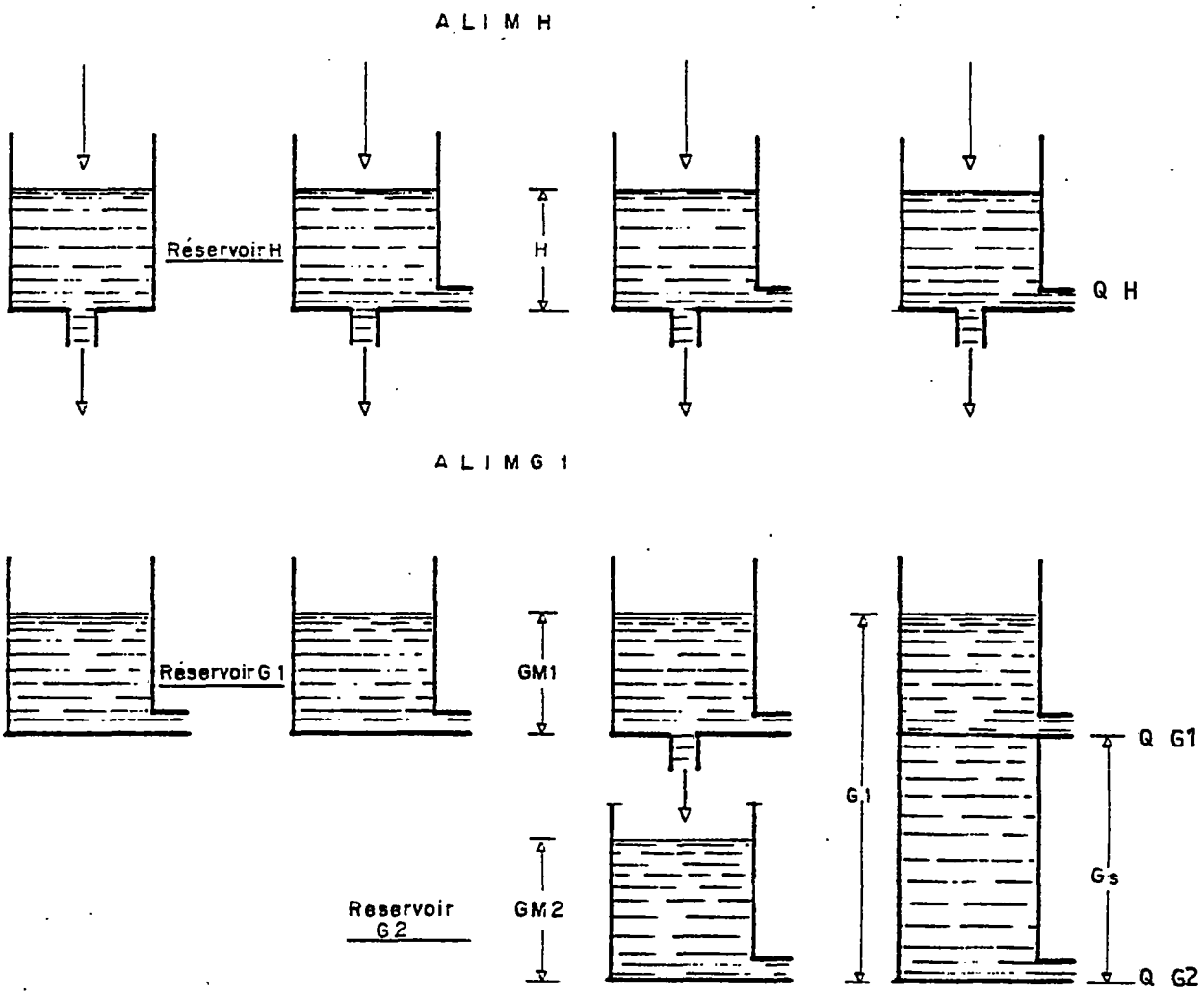


FIGURE 2 - Schémas de transferts simplifiés du modèle GARDENIA

5.3. INITIALISATION

Il est évident que l'inertie hydrologique d'un système étant parfois considérable, le calcul des premières valeurs dépend énormément des conditions des années précédentes. Pour éviter les problèmes qui pourraient en résulter, on a introduit dans le modèle la possibilité de prendre en compte quelques années de démarrage avant les premières observations hydrologiques. Cependant, la mise en régime étant parfois assez lente, on a placé le modèle en équilibre hydrologique en début de calcul, c'est-à-dire que le débit sortant est égal à la pluie (efficace) entrante.

6. LE BILAN DANS LA RESERVE SUPERFICIELLE

Le principe du modèle GARDENIA est le suivant.

La fonction "Production" est réalisée uniquement dans la réserve superficielle (nous n'employons pas -à dessein- le terme "réserve utile" ou "réserve facilement utilisable" qui est celui utilisé par les agronomes pour faire un bilan au niveau des racines des plantes, ce qui n'est pas exactement la même chose).

6.1. APPORTS DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Les apports de la réserve superficielle sont constitués par la pluie (et la fonte de la neige au contact du sol, si elle existe).

6.2. VIDANGE DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Elle peut être réalisée :

- par évapotranspiration réelle (ETR) qui est égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP) dans la limite de la quantité d'eau disponible,
- par vidange de l'excédent.

Si la hauteur RU de la réserve superficielle dépasse la valeur de rétention RUMAX, l'excédent ALIMH sort de cette réserve et pénètre dans le réservoir intermédiaire H :

$$ALIMH = RU - RUMAX$$

7. TRANSFERT DANS LES RESERVOIRS INTERMEDIAIRES ET SOUTERRAINS

7.1. LE RESERVOIR INTERMEDIAIRE

Le réservoir intermédiaire H est alimenté en eau par la réserve superficielle ; il est vidangé par deux exutoires :

- par percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

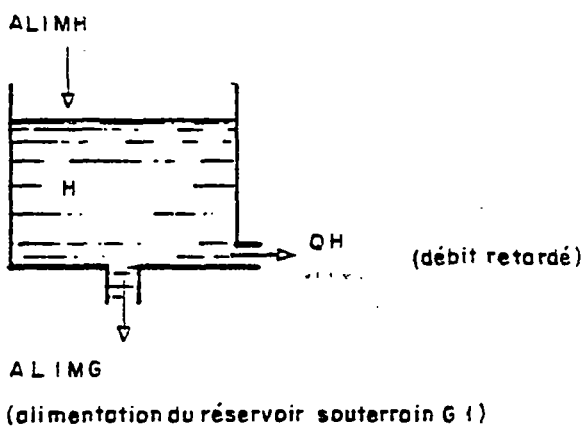
$$ALIMG = H \cdot dt / THG$$

(dt étant le pas de temps) ;

- par écoulement à l'extérieur sous forme de "débit retardé" QH suivant une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER qui est en fait la hauteur de H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

$$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$$

Cet écoulement non linéaire est prépondérant quand l'état de remplissage H est élevé ; la percolation est plus importante quand l'état de remplissage H est plus bas (le rapport QH/ALIMG est égal à H/RUIPER). (Si on donne une valeur très élevée à RUIPER -par exemple 9999 mm-, il n'y aura pas de débit retardé non linéaire). Le fonctionnement de ce réservoir se rapproche donc de celui d'un seuil de débordement à la hauteur RUIPER, mais avec une représentation plus réaliste de la séparation de l'écoulement en deux composantes qui ne s'excluent pas mutuellement.



Sauf en utilisation spéciale, l'évapotranspiration n'agit pas dans ce réservoir, qui ne sert qu'au transfert. Le calcul s'effectue de la manière suivante :

- apport d'eau ALIMH (provenant de la réserve superficielle),
- vidange ALIMG et QH.

7.2. LE RESERVOIR SOUTERRAIN G1

Le réservoir souterrain G1 est alimenté en eau par le réservoir intermédiaire H. Il est vidangé par deux exutoires dans le cas le plus général :

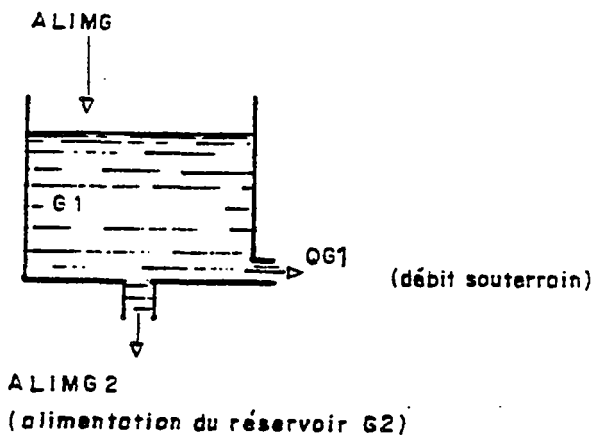
- par percolation dans le réservoir souterrain lent G2, suivant une vidange exponentielle de constante de temps TG12 :

  ALIMG2 = G1 . dt / TG12

  Cette percolation peut être supprimée dans les cas simples où il n'est pas nécessaire de faire intervenir deux composantes souterraines ;

- par écoulement vers l'extérieur sous forme de débit souterrain QG1, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG1 :

  QG1 = G1 . dt / TG1



Comme dans le réservoir intermédiaire H, le calcul s'effectue de la manière suivante :

- apport d'eau ALIMG1 (provenant du réservoir H),
- vidange ALIMG2 (éventuellement) et QG1.

7.3. LE RESERVOIR SOUTERRAIN LENT G2 (facultatif)

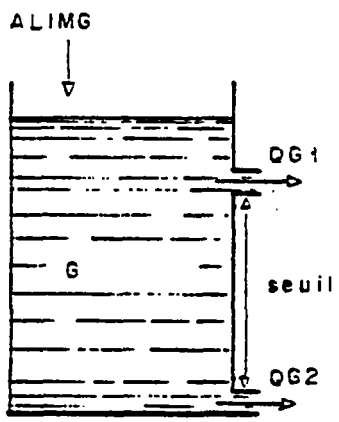
Ce réservoir, quand il existe, est alimenté en eau par le réservoir souterrain G1 ; il est vidangé uniquement sous forme de débit souterrain lent QG2. Un tel débit souterrain est parfois nécessaire pour représenter une composante très lente dans un écoulement.

Il est possible, sur option, de décider que ce débit souterrain lent QG2 s'infiltre vers des horizons plus profonds non contrôlés par l'exutoire. Cette option peut être intéressante pour tenir compte d'un débit de perte par infiltration qui est donc variable au cours du temps. Il faut cependant être

conscient que ce débit ne peut généralement pas être estimé et il faudra voir si les valeurs calculées par le modèle sont plausibles.

7.4. RESERVOIR SOUTERRAIN UNIQUE G

Il est parfois plus avantageux d'utiliser un seul réservoir G à deux exutoires séparés par un seuil. Un tel réservoir simule par exemple la mise en service d'un deuxième griffon (orifice) quand le niveau d'eau dépasse la valeur d'un seuil. Il peut également simuler une cote de débordement ou bien simplement représenter le fait qu'une courbe de tarissement descend plus rapidement au début (quand les deux exutoires débitent simultanément) qu'à la fin quand seul l'exutoire le plus profond est en service. Cette configuration est particulièrement intéressante pour la simulation des niveaux aquifères dans les piézomètres.



Un tel réservoir, qui remplace donc le réservoir G1 et l'éventuel réservoir G2, produit donc suivant le cas, un ou deux débits par lequel il se vidange :

- QG2 = G . dt / TG2
- QG1 = (G - SEUIL) . dt / TG1,
  si G est supérieur au SEUIL.

Comme pour le réservoir G2, il est possible de décider -sur option- que le débit QG2 s'infiltre et n'est pas contrôlé par l'exutoire.

8. LES SORTIES DU MODELE

Deux cas sont possibles suivant l'utilisation attendue du modèle :

* Si on s'intéresse au débit à l'exutoire du bassin versant, le modèle calculera :

$$Q = Q\,H + Q\,G1 + Q\,G2$$

ou bien : $$Q = Q\,H + Q\,G1$$

s'il a été décidé que le débit souterrain lent Q G2 s'infiltre et n'est pas contrôlé par l'exutoire du bassin (ou bien n'existe pas).
Ce débit Q exprimé en mm par pas de temps, sera transformé en m^3/s en fonction de la surface du bassin versant et de l'éventuel débit extérieur.

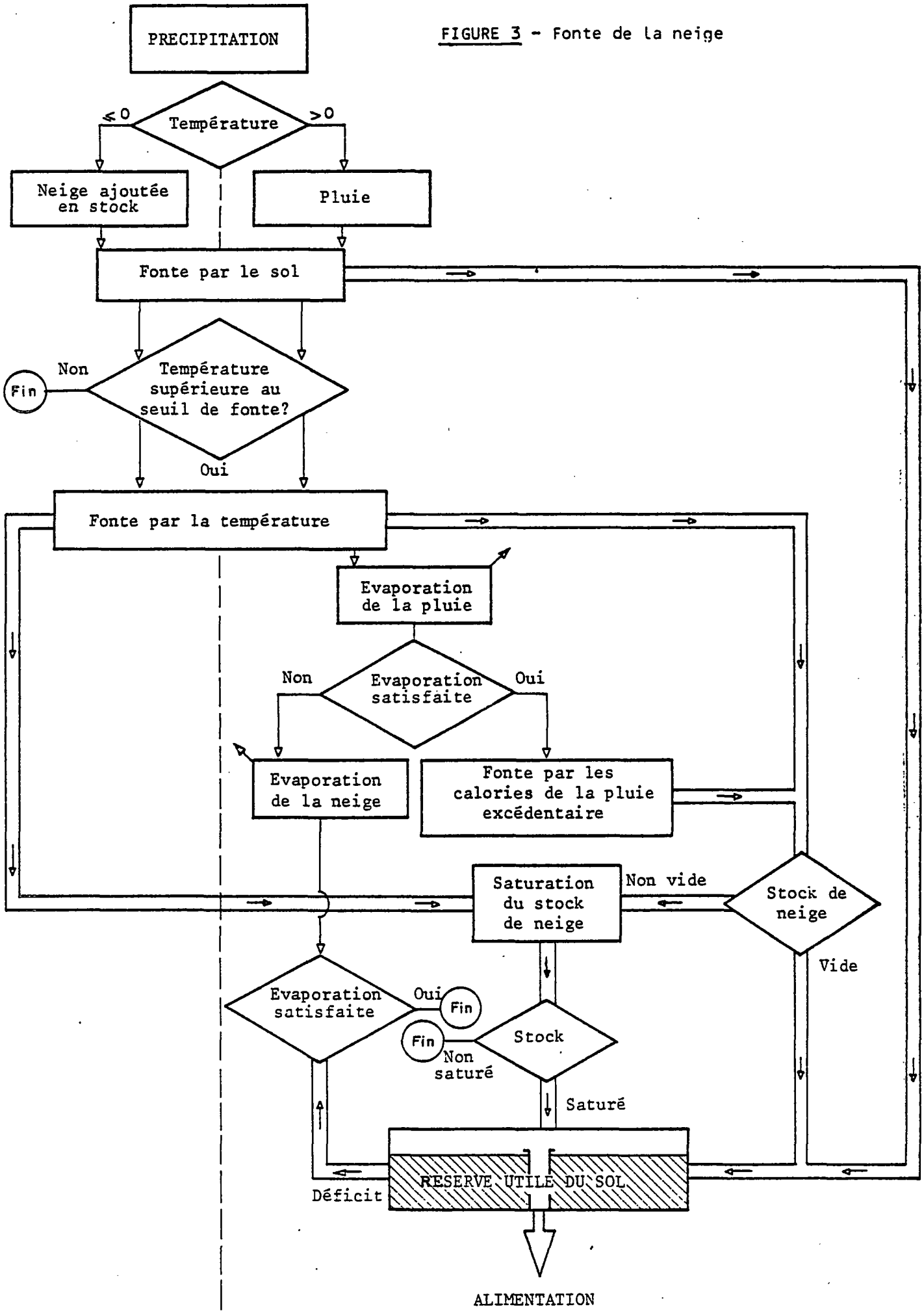
* Si on s'intéresse au niveau piézométrique en un point de l'aquifère, le modèle calculera :

$$Q = G1$$

ou bien : $$N = G$$

(dans le cas d'un réservoir unique à deux exutoires).
Ce niveau N, exprimé en mm, sera transformé en mètres NGF en fonction du coefficient d'emmagasinement global et du niveau de base local.

FIGURE 3 - Fonte de la neige



9. CALAGE DU MODELE

Le modèle est caractérisé par un certain nombre de paramètres globaux qui ne peuvent pas être mesurés sur le bassin. Les valeurs optimales de ces paramètres sont alors déterminées par un processus itératif à partir de valeurs initiales par recherche du meilleur ajustement entre observations et valeurs de sortie calculées par le modèle.

La méthode d'optimisation est fondée sur une adaptation de l'algorithme non linéaire de ROSEMBROCK. Le but de la méthode est de minimiser une fonction critère F, en faisant varier successivement p paramètres.

La fonction critère retenue est une caractéristique de l'écart entre les débits (ou les charges) calculés et observés, liés par la relation :

$$Y = AX + B + \varepsilon$$

où ε : écart de simulation

- pour un calcul de débit
  - X : somme des vidanges des réservoirs du modèle en mm/pas de temps,
  - Y : débit mesuré à l'exutoire en m^3/s
  - A : surface du bassin versant en mètres-carré (divisée par la durée du pas de temps
  - B : débit extérieur constant (généralement 0) en m^3/s
- pour un calcul de niveau piézométrique
  - X : niveau en mm dans le réservoir souterrain,
  - Y : niveau piézométrique mesuré en mètres au dessus d'un niveau de référence,
  - A : inverse du coefficient d'emmagasinement (divisé par 1000),
  - B : niveau de base local en mètres.

NOTA. A est l'inverse du coefficient d'emmagasinement (divisé par 1000) uniquement si le point d'observation est situé loin d'une limite à potentiel imposé (cours d'eau), sinon A sera plus petit (le coefficient d'emmagasinement apparent qui en serait déduit serait alors trop élevé).

A et B peuvent être imposés ou calculés par le modèle. La fonction F à minimiser est :

$$F = -\sqrt{1 - \frac{\Sigma\, p\,(Y - AX - B)^2}{VARY}}$$

où p est un coefficient de pondération (qui dépend de l'observation Y), VARY est la variance des observations.

On voit immédiatement que si A et B sont calculés par le modèle, à la pondération près, F est l'opposé du coefficient de corrélation R entre la série observée Y et la série calculée AX + B (on prend l'opposé du coefficient de corrélation car pour maximuser R, on minimise F = -R). Quand Y et X sont affines, R est égal à +1. Si A et B sont imposés, F est l'opposé d'un coefficient "d'ajustement" et n'atteint sa valeur minimale que quand Y et AX + B sont égaux (et non plus affines).

La méthode d'optimisation est itérative. Pour déterminer rapidement le jeu optimal de paramètres, il est conseillé :

- d'attribuer à chaque paramètre une valeur initiale aussi réaliste que possible,
- de fixer un nombre d'itérations MAXIT suffisant (environ 70 à 100).

Assez rapidement, la valeur du critère d'optimisation F ne diminue pratiquement plus. La solution optimale est atteinte lorsque chaque paramètre a atteint une valeur stable.

Il serait possible d'optimiser tous les paramètres à la fois, mais ce n'est pas forcément souhaitable. En effet, il est prudent que l'utilisateur contrôle le réalisme et la validité des paramètres obtenus. La convergence est d'autant plus lente, qu'il y a plus de paramètres à optimiser : cela conduit donc à des temps de calcul très longs, alors qu'une optimisation fixant temporairement une partie des paramètres à des valeurs réalistes permet d'améliorer rapidement la qualité des ajustements. Les paramètres qui étaient fixés peuvent alors être libérés pour terminer le calage.

En pratique, le nombre de paramètres à optimiser simultanément ne devrait pas trop dépasser une dizaine, mais le modèle permet d'en optimiser jusqu'à 20.

L'optimisation des paramètres est réalisée par le sous-programme de calcul ROSACE qui est une version améliorée de la méthode d'optimisation non linéaire de ROSEMBROCK. Cette méthode procède par tâtonnements successifs en explorant plus rapidement les directions qui produisent les améliorations les

plus significatives du calage. Le calage s'effectue par une suite d'optimisation de ce type, l'utilisateur restant seul juge de la qualité de la décomposition de l'écoulement qui a été trouvée par le modèle pour optimiser un critère qui reste toujours une évaluation très globale de la "qualité" d'une simulation.

Une option permet de privilégier plus ou moins les faibles valeurs de débits par une pondération effectuée au moment du calcul du critère d'ajustement.

Pour chaque paramètre, on peut préciser une valeur minimale et une valeur maximale. Lors des calculs d'optimisation, les paramètres resteront toujours compris entre ces deux valeurs, ce qui permet d'éviter un calage avec des valeurs peu réalistes. On évite ainsi que les premiers calculs d'optimisation "se perdent" vers des valeurs peu probables qu'ils auront du mal à quitter ensuite.

10. LES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DU MODELE

Ils sont au nombre de 15 (+ 2 paramètres optionnels) quand il y a prise en compte de la neige, et uniquement de 8 (+ 2 paramètres optionnels) dans le cas contraire.

Ils se divisent en 6 paramètres dimensionnels, 2 coefficients correctifs et éventuellement 7 paramètres pour la fonte de la neige :

* Les *6 paramètres dimensionnels* sont les caractéristiques des différents réservoirs :
  - . RUMAX (mm) Réserve superficielle maximale du réservoir RU,
  - . THG (mois) Temps de demi-montée du réservoir G1,
  - . RUIPER (mm) Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation,
  - . TG1 (mois) Temps de demi-tarissement du réservoir G1,
  - . TG12(*) (mois) Temps de demi-montée du réservoir G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2),
  - . TG2 (mois) Temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent).

* Les *2 coefficients correctifs* sont destinés à prendre en compte la non-représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant :
  - . CORPL (en %) Coefficient de correction des pluies chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées,
  - . CETP (en %) Coefficient de correction d'ETP, dont le but est similaire.

* Les *7 paramètres caractéristiques* des divers phénomènes pouvant affecter le stock de neige résultant de précipitations hivernales :
  - . GRADT (°C) Constante de correction de la température destinée à tenir compte d'un éventuel écart entre la température moyenne la mieux représentative du bassin versant et

---

(*) Dans le cas d'un réservoir souterrain G unique avec deux exutoires, TG12 est le seuil de séparation entre les deux exutoires (il est exprimé en mm).

NOTA. Dans un calcul de niveau de nappe, s'il y a deux composantes souterraines, le choix d'un réservoir unique G à deux exutoires est imposé.

la température fournie au modèle à partir d'une pondération effectuée sur différentes observations faites aux stations météorologiques les plus proches.

. DENSIM (%) Pourcentage de rétention maximale d'eau liquide d'un stock neigeux,

. EVNE (%) Coefficient caractérisant la sublimation du manteau neigeux dans une atmosphère où l'ETP n'est pas totalement satisfaite par les apports pluviométriques. Un stock de neige, s'il est suffisamment fourni, perd par sublimation un volume d'eau équivalent à PNx(1+EVNE)/100 où PN représente l'ETP résiduelle non satisfaite par la pluie.

. FONP (%) Pourcentage caractéristique de la fonte d'un stock neigeux, par une pluie PN à la température TEMP. La quantité de neige susceptible de fondre par ce phénomène vaut : PN x (1 + FONP/100) x TEMP/80

. TFONT (°C) Seuil de température en dessous duquel la neige ne fond plus (proche de zéro degré C).

. DJOU (mm/°C.jour) Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action d'un excès de température de 1°C au dessus de TFONT.

. FSOL (1/10ème mm/jour) Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action ces calories dégagées par le sol.

En outre, deux autres paramètres peuvent, sur option, être calculés par le modèle, à partir de l'équation de régression linéaire qui transforme :

- soit le niveau du réservoir souterrain du modèle en niveau piézométrique observé,
- soit la somme des vidanges des réservoirs du modèle en débit observé à l'exutoire.

Comme on l'a dit plus haut, ces deux paramètres sont suivant le cas :

- le coefficient d'emmagasinement "équivalent" et le niveau de base local, ou
- la surface du bassin versant et un débit extérieur constant (ce débit extérieur constant étant le plus souvent imposé égal à zéro).

11. MODE D'EMPLOI DU MODELE GARDENIA

Le programme GARDENIA, écrit en FORTRAN IV, fonctionne en interactif, c'est-à-dire qu'un certain nombre de questions sont posées à l'utilisateur (sur la console), et qu'un certain nombre de "menus" lui sont présentés parmi lesquels il doit choisir celui qui lui convient le mieux.

11.1 DEFINITION DU NOMBRE ET DU CONTENU DES FICHIERS ET DES PARAMETRES

Les données climatiques et hydrologiques, et les paramètres sont sur des fichiers qui sont au nombre de 1 à 5, suivant les options choisies. Il est en général conseillé d'avoir un fichier pour chaque type de données, soit :

- un fichier pour les paramètres de départ du modèle,
- un fichier pour la pluie,
- un fichier pour l'évapo-transpiration potentielle,
- un fichier pour les données de température de l'air (s'il y a lieu de modéliser la fonte de la neige),
- un fichier pour les débits ounniveaux observés (s'il y en a), c'est-à-dire pour le calage.

Il est possible de regrouper toutes les données dans un seul et même fichier, mais ce n'est pas souhaitable, car ce système manque de souplesse, surtout quand plusieurs bassins sont étudiés simultanément.

REMARQUE 1. Si aucun fichier de paramètres n'existe, une option permet de le créer à la console, mais c'est un processus assez lent qui n'est utilisé en général que pour la première fois. Le fichier généré après calcul est en effet sauvegardé (sous le nom de CREPARA.OUT) et pourra être réutilisé éventuellement après modification à l'éditeur de texte (et changement de nom).

REMARQUE 2. Il est possible de traiter simultanément plusieurs bassins à la fois. Les fichiers de pluies seront placés les uns après les autres, de même pour les fichiers d'ETP, de température et de débits (ou niveaux) observés.

REMARQUE 3. Il est possible de regrouper dans un même fichier (à la suite) et dans cet ordre, les fichiers de :

1) Pluie,

2) Température (s'il y a prise en compte de la fonte de la neige),
3) ETP,
4) Observations de niveau ou de débit (si elles existent).
Si on traite simultanément plusieurs bassins, on mettra les données bassin par bassin :
Pluie 1, Température 1, ETP 1, Observations 1 - Pluie 2, Température 2, ETP 2, Observations 2 - etc ...

11.2. QUESTIONS PRELIMINAIRES POSEES PAR LE PROGRAMME

Dès le début, plusieurs questions sont posées à l'utilisateur sur la console :

* *Question 1* - *Désire t'on refaire un passage identique au précédent ?*

Si on a déjà fait un passage, toutes les réponses aux questions posées après celle-ci (présence de neige, noms des fichiers à lire) ont été enregistrées sur un fichier (de nom GARCOMAND.DAT). On peut alors réaliser un passage identique avec par exemple d'autres fichiers de données ou bien réaliser un complément de calage. Il suffit pour cela de changer ces noms de fichiers -à l'éditeur de texte- dans le fichier GARCOMAND.DAT. Il n'est alors plus nécessaire de répondre aux questions suivantes, car la réponse sera lue automatiquement. On supprimera ainsi le temps passé à répondre aux questions et on limitera les erreurs dues à de mauvaises réponses.

* *Question 2* - *Désire t'on prendre en compte la fonte de la neige ?*

Si on répond NON, toutes les données de précipitations seront considérées comme de la pluie.

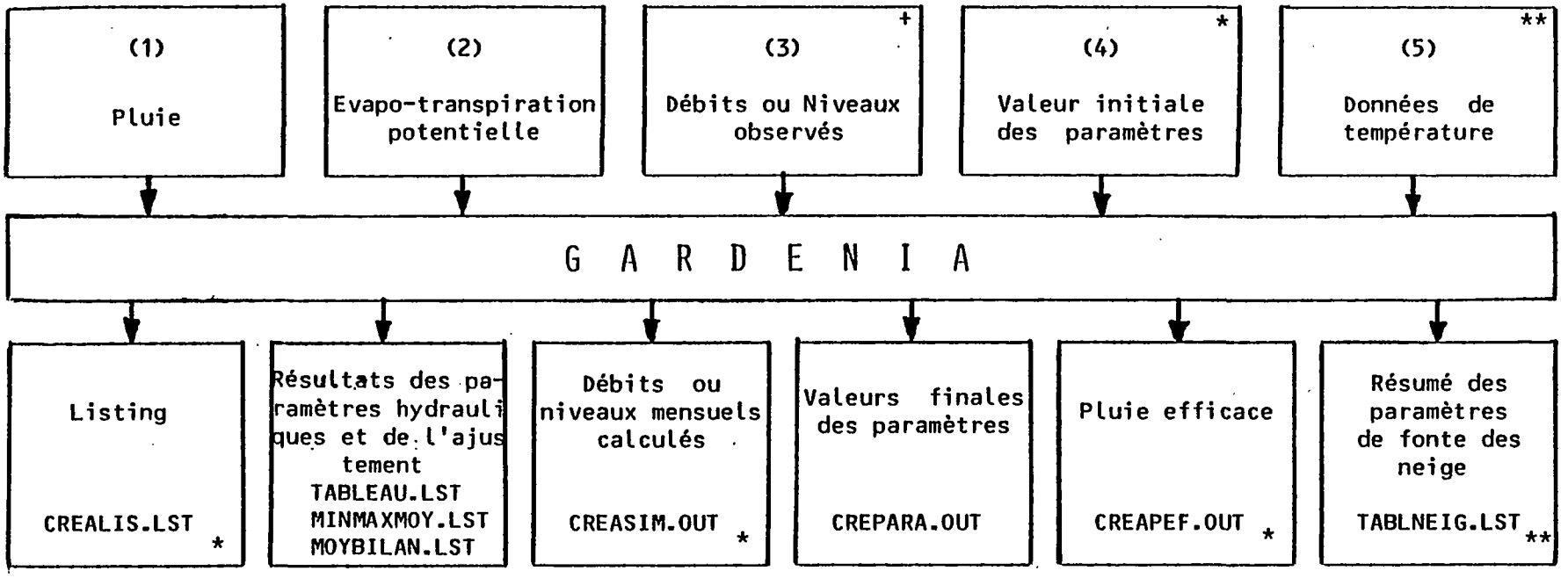
* *Question 3* - *Dispose t'on d'un fichier de paramètres ?*

S'il y a un fichier de paramètres, le programme demandera le nom de ce fichier et y lira les valeurs des options et des paramètres hydrologiques.

S'il n'y a pas de fichier de paramètres, l'utilisateur devra donner à la console les valeurs de toutes les options et de tous les paramètres, ce qui peut être assez long, mais est très pratique pour une première utilisation.

Après chaque passage, et en particulier après une première utilisation où l'utilisateur a donné les paramètres en interactif, un fichier de paramètres actualisé est créé par le programme sous le nom de "CREPARA.OUT". Il est alors utile de changer le nom de ce fichier (pour le sauvegarder). Ce fichier pourra être utilisé :
- pour un complément de calage si nécessaire (il n'y aura plus à redonner à

FIGURE 4 - Fichiers pour le programme GARDENIA



\+ pour le calage uniquement (pas nécessaire pour une simulation de scénarios)
* optionnel
** uniquement pour une prise en compte de la fonte des neiges

NOTA. Les fichiers (1), (2), (3) et (5) peuvent (sur option) être regroupés en un fichier unique.

la console la valeur de tous les paramètres et options),

- pour calculer des débits ou des niveaux, à partir de séries climatiques observées (ou générées) si le calage est reconnu comme satisfaisant.

* *Question 4* - *Les données sont-elles sur des fichiers séparés ?*

* *Question 5* - *L'écoulement très lent (s'il existe) se perd-t'il par infiltration profonde ?*

La réponse standard est : NON.

* *Question 6* - *Y a t'il une reprise par évapo-transpiration potentielle dans les réservoirs H, H+G1, H+G1+G2 ?*

La réponse standard est : 0, c'est-à-dire aucune reprise.

12. DESCRIPTION DU FICHIER DES PARAMETRES

Ce fichier peut avoir différentes formes, suivant :

- s'il y a prise en compte de la neige ou non,
- si on fournit des bornes pour les paramètres ou non.

Le fichier de paramètres est divisé en deux parties :

- 35 lignes de paramètres généraux communs à tous les bassins ;
- suivies de 28 (ou 35, s'il y a prise en compte de la neige) paramètres pour chaque bassin étudié.

Pour un bassin unique, il y a :

- 43 lignes, s'il n'y a pas de fonte de neige,
- 50 lignes, s'il y a prise en compte de la neige.

Les lignes n° 16, 17, 19, 21, 22, 24, 27, 29, 31, 32, 34, 36 et 37 ne sont que des séparations pour plus de clarté dans le fichier, mais ne décrivent pas de paramètres.

Si on définit des bornes minimales et maximales pour les paramètres hydrologiques, on ajoutera pour le premier cas uniquement :

- 8 lignes (soit 51 au total), s'il n'y a pas de fonte de neige,
- 15 lignes (soit 65 au total), s'il y a prise en compte de la neige.

5 exemples de jeux de paramètres sont présentés dans l'annexe 4.

DESCRIPTION DES PARAMETRES

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
1	Titre donnant des détails sur la simulation, les hypothèses faites, la date
2	Nombre de bassins à étudier successivement dans cette simulation (les données de chaque bassin doivent se suivre) Valeur standard : 1
3	Simulation de débit ou de niveau ? 0 = débit ; 1 = niveau
4	Présence d'une séquence d'observations de débit ou de niveau 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 1 pour un calage ; 0 pour une extension de donnée
5	Ecriture sur fichier de la pluie efficace calculée ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 0
6	Ecriture sur fichier des débits ou niveaux calculés ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 0 pour le calage 1 pour une extension de données
7	Edition des bilans mensuels ? 0 = Non ; 1 = Oui annuels ; 2 = Oui mensuels Valeur standard : 1
8	Analyse statistique des pluies efficaces calculées ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 0
9	Analyse statistique des débits ou niveaux calculés ? 0 = Non ; 1 = Oui Valeur standard : 0
10	Réduction du "Listing généré" (fichier CREALIS.LST) 0 = pas de réduction ; 1 = réduction 2 = suppression (il n'y aura alors ni graphique sur imprimante, ni édition des bilans, ni analyses statistiques) Valeur standard : 0 ou 1

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
11	Dessin sur imprimante des débits ou niveaux calculés et observés ? 0 = Non ; 1 = Oui (fichier CREALIS.LST) Valeur standard : 0 si on dispose d'une table traçante 1 si on ne dispose pas d'une table traçante
12	Analyse de la différence entre simulation observation 0 = Non ; 1 ou plus = Oui Valeur standard : 0
13	Dessin sur table traçante des débits ou niveaux observés ? 0 = Non ; 1 = Oui 2 = Oui, avec en plus détail des composantes souterraines (pour un calcul de débits seulement)
14	Fourniture de valeurs limites pour les paramètres hydrologiques ? 0 = Oui ; 1 = Non Valeur standard : 1. Dans ce cas, des paramètres supplémentaires doivent être placés après la ligne 43 (ou 50 s'il y a prise en compte de la neige)
15	Pondération des écarts : 0 ou 1 = pas de pondération 2 ou 3 = pondération donnant plus de poids aux faibles valeurs (étiages) -2 ou -3 = pondération donnant plus de poids aux fortes valeurs (à éviter) Valeur conseillée : 0 pour des niveaux ; 2 pour des débits
16 17	Lignes de séparation

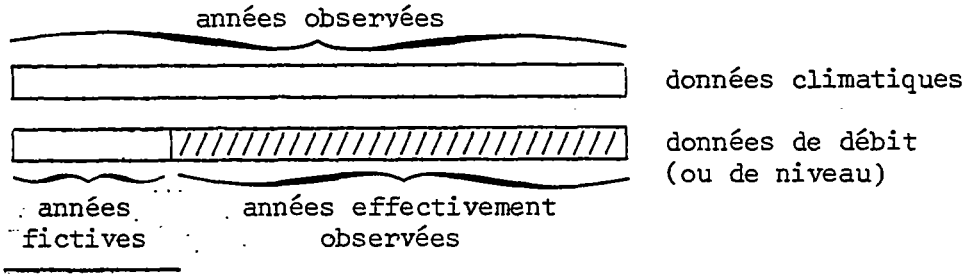
Lignes 18 à 35 : Définition des pas de temps

18	Durée du pas de temps des pluies 0 = journalier ; 1 = pentadaire ; 2 = décadaire ; 3 = mensuel
20	Format des données de pluies 0 = séquentiel ; 1 = "standard" Le format le plus classique est le format séquentiel. Le format "standard" correspond à un type de fichier qui rassemble à la fois des données pentadaires, décadaires et mensuelles
23 25	Durée du pas de temps de température. Format des données de température. Quand il n'y a pas de calcul de fonte de neige, ces lignes doivent quand même exister ; leurs valeurs ne sont alors pas prises en compte.

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
28 30	Durée du pas de temps et format des données d'évapotranspiration potentielle ETP (données généralement mensuelles)
33 35	Durée du pas de temps et format des données de débits, de niveaux ou de concentrations observés

Les lignes 16, 17, 19, 21, 22, 24, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 36 et 37 sont des lignes de commentaires ou de séparations

38	Titre donnant le nom du bassin et de la station de jaugeage (ou du point de mesure des niveaux)
39 40	Valeur maximale et minimale des observations (de débit ou de niveau). Les valeurs inférieures au minimum ou supérieures au maximum ne seront pas prises en compte et seront considérées comme absentes.
41 42	Largeur et hauteur en centimètres du dessin sur table traçante des débits calculés (et éventuellement observés). Largeur maximale = 300 cm - Hauteur maximale = 65 cm Valeurs maximales conseillées : largeur = 25 cm (pour format 21 x 29,7) hauteur = 16 cm
43	Ligne de séparation
44	Nombre d'années de données. Ce nombre d'années doit être le même pour toutes les données : pluie évapo-transpiration potentielle (ETP), débit ou niveau observé, température.
45	Nombre d'années de démarrage des calculs Le débit ou le niveau du premier mois de la première année dépend bien évidemment des données climatiques de plusieurs mois auparavant. Le premier mois de débit (ou niveau) ne peut donc pas être simulés correctement à partir du premier mois de pluie (et ETP et température). On considère donc que les débits (ou les niveaux) sont calculés correctement à partir d'un certain nombre d'années dites "années de démarrage". Les valeurs calculées pendant ces années de démarrage ne sont pas prise en compte pour la comparaison avec les valeurs calculées. Les séries de données climatiques et de données observées (débit ou niveau) ayant le même nombre d'années, les premières années sont donc perdues. Pour éviter cet inconvénient, il est conseillé de rassembler les données climatiques (pluie, ETP, température) pendant une (ou quelques) année(s) avant la première année de débit ou niveau observé. On créera alors l'(ou les) année(s) correspondante(s) de débits (ou niveaux) observés au

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
	moyen de valeurs fictives qui ne seront pas prises en compte dans les calculs, mais serviront seulement à occuper une place dans les données.  EXEMPLE 1. Période d'observation des débits : 1975-1978, soit 4 ans. On rassemble également la pluie et l'ETP de 1974, et on crée une année 1974 fictive de débits (avec par exemple des valeurs égales à -1). Il y a alors au total 5 années et le nombre d'années de démarrage est de 1. Nota. Quand les données climatiques ne sont pas disponibles avant la première année d'observation de débit (ou de niveau), le modèle peut créer artificiellement de telles années avec pour chacun des pas de l'année, la moyenne interannuelle des valeurs observées. Cette procédure est cependant moins précise que la précédente et doit être évitée si possible. Pour l'utiliser, il suffit d'affecter un signe négatif le nombre d'années de démarrage donné comme paramètre 45 EXEMPLE 2. Avec les données précédentes, observations de débits, de pluies et d'ETP sur les 4 années de la période 1975-1978, on indique -1 année de démarrage. L'année 1974 sera alors créée automatiquement. Il y a au total 4 années d'observation. Valeur standard : +1 = pour une simulation des débits, +2, 3 ou 4 ou plus = pour un simulation de niveau (suivant l'inertie de la nappe qui sera appréciée par la (ou les) constante(s) de temps de tarissement). On peut aussi, et c'est ce qui est le meilleur, cumuler les vraies et les fausses années de démarrage. EXEMPLE 3. Avec les données précédentes, observations de débits (ou de niveaux), de pluies, d'ETP (et de température), sur les 4 années de la période 1975-1978 ; on rassemble également les données climatiques de l'année 1974, on crée une année fictive de débits (ou de niveaux) (avec par exemple des valeurs égales à -1), et on indique par exemple -3 années de démarrage. Les années 1971 à 1973 seront alors créées automatiquement. Il y aura alors au total 5 années d'observations, c'est-à-dire 5 années de données réelles et -3 années de démarrage.
46	Nom de la première année. C'est le nom de la première année d'observation de données climatiques (pluie et ETP). Dans les exemples 1 et 4, la première année est 1974 ; dans l'exemple 2, la première année est 1975.

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
47	Nombre d'années de prévision (NPREV) Le calcul de prévision n'est pas encore adapté dans le programme GARDENIA. Il faut donc imposer 0 années de prévision. Valeur obligatoire : 0
48	Numéro du dernier pas observé. Cette valeur est utilisée pour le dessin sur table traçante : la dernière année, les valeurs observées ne sont pas tracées après le dernier mois. Valeur standard : 0 qui signifie "dernière années complète"
49	Numéro du dernier pas observé pour l'ETP Valeur standard : 0 qui signifie "dernière année complète"
50	Nombre maximal d'itérations pour le calage. Plutôt que de réaliser le calage par un seul "passage" comprenant un très grand nombre d'itérations, il est souvent souhaitable de réaliser plusieurs passages avec environ 70 itérations pour chacun, avec un examen approfondi des résultats entre chaque passage. Valeur standard : 70 pour un passage de calage, 0 pour une extension de données ou une simulation
51	Nombre moyen de jours de pluies par mois exprimé en pourcentage. Valeur obligatoire : 100 % (0 % est compris comme 100 % par le programme).
52	Option pour les composantes souterraines de l'écoulement. 0 ou 1 = 1 composante souterraine 2 = 2 composantes souterraines "en cascade" 3 = 2 composantes souterraines réalisées par un réservoir unique ayant deux orifices séparés par un seuil de séparation. Nota. Pour un calcul de niveau de nappe, si on sépare 2 composantes, il faut utiliser obligatoirement l'option 3. Valeur standard : 0 ou 2 (si nécessaire) pour un calcul de débits 0 ou 3 pour un calcul de niveaux Nota. Il est conseillé de ne conserver qu'une seule composante souterraine (option 0) à chaque fois que possible pour privilégier la stabilité du calage.
53	Utilisation pour chaque année d'évapo-transpiration potentielle d'une valeur moyenne interannuelle pour chacun des pas de l'année ? 0 = Non ; 1 = Oui. L'option 1 ne sera utilisée que quand on ne dispose pas de données d'ETP pour toutes les années, ce qui sera parfois le cas en extension ou surtout en génération de données. Valeur standard : 0 pour un calage 0 ou 1 pour une extension de données

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
Lignes 54 à 61 : 8 paramètres hydrologiques	
54	Coefficient de correction homothétique des pluies en pourcentage (toutes les pluies de tous les mois sont corrigées globalement d'un même pourcentage). EXEMPLE : 15 signifie + 15 %, c'est-à-dire multiplication par 1,15. Valeur standard : 0 % Optimisation : 0 (0 = Non ; 1 = Oui), sauf si les pluies exactes sont mal connues en région montagneuse par exemple.
55	Capacité de la réserve disponible pour l'évapotranspiration (appelée parfois "réserve utile" par abus de langage). Valeur de départ : 70 mm Optimisation : 1
56	Coefficient de correction homothétique de l'ETP en pourcentage (toutes les ETP de tous les mois sont corrigées globalement d'un même pourcentage). Valeur de départ : 0 % Optimisation : 1
57	Hauteur d'égale répartition entre écoulement superficiel et percolation alimentant l'écoulement souterrain. Quand le niveau dans le réservoir intermédiaire est égal à n fois cette hauteur, l'écoulement superficiel instantanné est égal à n fois la percolation. Réciproquement, quant le niveau est égal à 1/n fois cette hauteur, la percolation est égale à n fois l'écoulement superficiel. REMARQUE. Pour un calcul de niveau, il faut être assez prudent pour éviter que la majeure partie des précipitations efficaces ne soit évacuée en écoulement superficiel, la faible composante souterraine étant compensée par un fort coefficient d'amplitude (faible "coefficient d'emmagasinement apparent"). Valeur de départ : 70 mm (difficile à préciser... peut atteindre 500 mm ou plus) Optimisation : 1
58	Temps de demi-montée. C'est le temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement du débit souterrain. Ce temps est exprimé en mois. Valeur de départ : 0,5 mois pour un calcul de débit 1 à 5 mois pour un calcul de niveau de nappe libre Optimisation : 1

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
59	Temps de demi-tarissement de la composante souterraine rapide (en mois). C'est le temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de la composante souterraine rapide est divisé par deux. Valeur de départ : 2 mois pour un calcul de débit 3 à 8 mois pour un calcul de niveau de nappe libre Optimisation : 1
60	* Si la ligne 52 a la valeur 2 (2 composantes souterraines), ce paramètre indique le temps de demi-transfert du réservoir souterrain de la composante rapide à celui de la composante lente. Il est exprimé en mois. Valeur de départ : 1 mois Optimisation : 1 * Si la ligne 52 a la valeur 3 (2 composantes dans un seul réservoir), ce paramètre indique le seuil au dessus duquel apparait le débit souterrain "rapide". Valeur de départ : 50 mm Optimisation : 1 * Si la ligne 52 a la valeur 0 ou 1 (1 seule composante souterraine), ce paramètre n'est pas utilisé. Valeur fictive : 50 par exemple. Optimisation : 0
61	* Si la ligne 52 à la valeur 2 ou 3 (c'est-à-dire 2 composantes souterraines) : temps de demi-tarissement de la composante souterraine lente. C'est le temps nécessaire pour qu'en l'absence d'alimentation du réservoir correspondant, le débit de la composante souterraine lente soit divisé par deux. Ce temps de demi-tarissement doit être au moins égal au temps de tarissement de la composante rapide. Valeur de départ : 3,5 mois pour un calcul de débit, 4 à 8 mois pour un calcul de niveau de nappe libre Optimisation : 1 Nota. Il convient de veiller à ce que ce paramètre n'atteigne pas de valeurs trop élevées (15 ou 20 mois), sinon il faut disposer d'une longue période de calage et d'une longue période de démarrage pour évider les ennuis dûs à une très grande inertie. * Si la ligne 52 à la valeur 0 ou 1 (1 seule composante souterraine), ce paramètre n'est pas utilisé. Valeur fictive : 50 par exemple Optimisation : 0 * Si on a choisi l'option laissant s'infiltrer le débit souterrain lent, si la ligne 52 a la valeur 2, si on calcule des débits (et non des niveaux), ce paramètre n'a pas d'action. Valeur fictive : 50 par exemple Optimisation : 0

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
	Dans la plupart des cas, le coefficient d'emmagasinement apparent n'est pas connu, et il devra être calculé par le modèle. Il sera intéressant de comparer ce coefficient avec un coefficient d'emmagasinement de nappe libre ou à une valeur de porosité efficace, pour voir si l'ordre de grandeur est à peu près identique. Il faut cependant garder à l'esprit que si le point d'observation de niveau est proche d'un cours d'eau (ou d'un lac) qui impose un niveau constant, le coefficient d'emmagasinement apparent sera considérablement sur-estimé. Comme on l'a souligné à propos du paramètre de la ligne 57, il faudra veiller à ce que le coefficient d'emmagasinement apparent calculé ne soit pas extrêmement faible pour compenser le fait que la majorité de l'écoûlement s'effectue en écoulement superficiel. Valeur de départ : valeur estimée ... (sans grande importance). Optimisation : 1 Il convient impérativement de laisser le modèle calculer ce coefficient.
	Lignes 61.1 à 61.7 : paramètres pour la fonte de la neige. Quand le modèle prend en compte la fonte de la neige, il faut définir 7 paramètres qui sont placés entre les lignes 61 et 62. Ces paramètres sont les suivants :
61.1 (64)	Coefficient de correction de température (positive ou négative). (en °C). La température de l'air n'étant pas toujours connue exactement sur le bassin, on applique une correction constante (un décalage) pour la corriger globalement. Cette correction ne devrait pas trop dépasser plus ou moins 3 degrés, sauf si la station est vraiment éloignée du bassin. Valeur de départ : 0°C Optimisation : 1
61.2 (65)	Rétention par la neige (en %). Quand la neige fond ou reçoit de la pluie à sa surface supérieure, une partie de cette eau (liquide) est retenue par capillarité. Cette rétention est proportionnelle à la hauteur de neige (si on suppose une densité à peu près constante... ce qui n'est bien entendu qu'une approximation). La rétention dans la neige est donc exprimée en %. Valeur de départ : 5 % Optimisation : éventuellement
61.3 (64)	Coefficient d'évaporation de la neige (en %). Quand l'évapo-transpiration potentielle n'est pas satisfaite par les précipitations, le restant peut être prélevé à la neige par sublimation. Cependant, le taux d'évaporation n'est pas le même pour l'eau dans la réserve du sol ou dans la neige. Ce coefficient est donc un coefficient correcteur. Ce coefficient correc-

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
	teur de 20 % par exemple, indique que l'évapo-transpiration potentielle quand elle est appliquée à la neige, doit être augmentée de 20 %. Valeur de départ : 0 % Optimisation : 0 (pour les premiers passages)
61.4 (65)	Coefficient de fonte par les calories de la pluie. La fonte théorique par les calories de la pluie FONTP est définie par : FONTP = PN . TEMP/80 avec : PN = pluie nette TEMP = température 80 = chaleur latente pour faire fondre 1 gramme de glace La fonte par la pluie est donc corrigée par un facteur global : exemple 20 signifie une augmentation de 20 %. Il convient de remarquer cependant que la fonte par les calories de la pluie est très faible devant la fonte par la température de l'air, surtout au pas de temps mensuel. Valeur de départ : 0 % Optimisation : 0
61.5 (66)	Seuil de fonte naturelle SF (en °C) (positif ou négatif). C'est le seuil de température au dessus duquel commence la fonte de la neige. Cette température est généralement très proche de de 0°C, mais elle peut être un peu différente pour tenir compte de la différence entre la température de l'air mesurée et la température réelle à l'interface air-neige. Valeur de départ : 0°C Optimisation : 1
61.6 (67)	Coefficient de fonte (par la température) DJ. C'est le coefficient "degré-jour" bien connu. On considère que la fonte FONTT est proportionnelle au nombre de degrés (de température) au dessus du seuil de fonte SF (proche de 0°) et à la durée : FONTT = DJ x (TEMP - SF) x DUREE Les valeurs courantes sont de 3 à 5 millimètres de fonte par degré par jour. Valeur de départ : 4 mm Optimisation : 1
61.7 (68)	Fusion de la neige par contact avec le sol, exprimée en 1/10 de millimètre par jour. Valeur de départ : 5 dixième de millimètre par jour Optimisation : 1
63.1 à 63.8 (puis 63.9 à 63.12)	Valeurs minimales et maximales admises pour les 8 paramètres hydrologiques (et les 7 paramètres de fonte de la neige). Ces valeurs ne figurent que si on a donné la valeur 1 à la ligne n° 14, et de toute façon ne figurent que pour le bassin n° 1 (si on simule plusieurs bassins, les valeurs limites utilisées dans les calculs seront celles du bassin n° 1).

NUMERO DE LA LIGNE	SIGNIFICATION
62	* Pour un calcul de débit : débit extérieur Qo (en m^3/s). Ce débit est un débit non contrôlé par la mesure à l'exutoire. Le débit observé QOBS se déduit du débit calculé QCAL par la relation : QOBS = QCAL + Qo + écart. Ce débit extérieur doit être en principe imposé à 0, sauf cas très particuliers : fuite du bassin, exportation ou importation d'eau par un canal, prélèvement, échanges latéraux de bassin à bassin. Valeur standard : 0 m^3/s Optimisation : 0 * Pour un calcul de nappe libre : niveau de base (niveau absolu en mètre). Ce niveau de base correspond au niveau qui serait atteint (au bout d'un temps suffisamment lent) en l'absence totale d'alimentation. Valeur de départ : niveau de base estimé. Optimisation : 1 Il convient impérativement de laisser calculer ce niveau de base. Le calcul étant effectué par régression linéaire, la valeur de départ n'a pas d'importance.
63	* Pour un calcul de débit : superficie du bassin-versant SURF (en km). Cette superficie est généralement la superficie du bassin versant telle qu'elle est déterminée à partir d'une carte topographique. La valeur de ce paramètre doit alors être imposée à cette valeur mesurée. Cependant, dans un certain nombre de cas, cette superficie est inconnue ou mal connue : - bassin d'alimentation d'une source, - exutoire ne contrôlant qu'une partie du bassin versant (exutoires multiples), - parties endorhéiques dans le bassin versant. Dans ces cas, il peut être utile de faire calculer au modèle, la superficie la plus appropriée. Il convient de remarquer qu'il est dangereux de laisser calculer au modèle à la fois : - un coefficient sur les pluies, - un coefficient sur l'ETP, - la surface du bassin versant. En effet, on montre que si on multiplie par un facteur K la pluie, l'ETP, la réserve utile, on obtient une "pluie efficace" multipliée par k et (en multipliant le seuil de séparation par k), on obtient un débit équivalent en divisant la superficie du bassin versant par le facteur k. Il faut donc imposer les paramètres les mieux connus (par exemple, la correction sur les pluies) et optimiser la surface (cas d'une source) ou bien le contraire (bassin de superficie connue, mais stations pluviométriques peu représentatives ou à des altitudes variées). Valeur standard : superficie mesurée Optimisation : 0 * Pour un calcul de niveau de nappe : coefficient d'emmagasinement apparent global (sans unité).

13. LES FICHIERS DES DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Toutes les données hydroclimatiques sont au pas journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel, et ont la même structure de "paquet de données". Un paquet de données est composé :

a) pour les données pentadaires, décadaires et mensuelles (bordereau III.1) :
- d'une ligne titre (de 80 caractères) précisant le type de données, les unités, le lieu, la période, etc...,
- suivie par année de :
  . 6 lignes de 12 valeurs pour 72 pentades par ans si les données sont pentadaires,.
  . 3 lignes de 12 valeurs pour 36 pentades par an, si les données sont décadaires,
  . 1 ligne de 12 valeurs pour 12 mois par an, si les données sont mensuelles.

  chaque ligne contient 12 valeurs codées chacune sur 6 colonnes (caractères), soit 72 colonnes par ligne :

  exemples : 5 années pentadaires = 31 lignes,
  8 années décadaires = 25 lignes,
  15 années mensuelles = 16 lignes.

b) pour les données journalières (bordereau III.2) :
- d'une ligne titre (de 80 caractères) par année,
- suivie de 2 lignes par mois (soit 24 lignes pour les 12 mois) avec pour chaque mois :
  . les valeurs du jour 1 au jour 16, sur la première ligne,
  . les valeurs du jour 17 au jour 28, 29, 30 ou 31 sur la deuxième ligne.

  chaque valeur est codée sur 5 colonnes.

NOTA. Pour faciliter l'introduction des données journalières, on peut utiliser le bordereau III.3, mais les données devront être rendues séquentielles par le programme TRANSDON.

NOTA. Dans tous les cas, chaque année doit être complète, c'est-à-dire comporter 365 ou 366 jours, ou 72 pentades, ou 36 décades, ou 12 mois.

Les "mois", "décades" ou "pentades" doivent en principe être homogénéïsés pour correspondre à des pas de temps égaux. Ceci peut être fait avec le programme de calcul TRANSDON qui permet en particulier de calculer une série pentadaire de 72 valeurs à partir de 365 ou 366 valeurs journalières.

Un exemple de données de chaque type est reproduit sur le tableau III.4 de l'annexe 4.

14. LES RESULTATS PRODUITS PAR LE MODELE

Le modèle GARDENIA calcule une série de débits ou de niveaux (au choix), à partir de données climatiques et d'un jeu de paramètres.

Après les calculs, on obtient les résultats suivants (figure 4) :

- coefficient d'ajustement pondéré et non pondéré entre les débits (ou niveaux) calculés et les débits (ou niveaux) observés, s'ils existent ;

- bilan mensuel de toutes les années avec pluie, ETP, ETR, écoulement superficiel, écoulement souterrain rapide et lent, et état des principaux réservoirs, etc... (édition sur option uniquement) ;

- dessin sur imprimante des débits (ou niveaux) calculés et observés s'ils existent (sur option) ;

- dessin sur table traçante de ces mêmes valeurs avec éventuellement (pour les calculs de débit) décomposition de l'écoulement en composante superficielle et souterraine (sur option) (figures II.1 à II.3 de l'annexe 2) ;

- édition sur un fichier séparé de la "pluie efficace" calculée, cette "pluie efficace" comprend le ruissellement et l'infiltration ; ce fichier peut être utilisé comme entrée pour un modèle hydrodynamique par exemple (sur option) ;

- édition sur fichier séparé des débits (ou niveaux) calculés (sur option) ; ce fichier peut être utilisé pour une analyse statistique détaillée ou pour simuler le fonctionnement d'une micro-centrale ou d'un barrage ;

- édition sur fichier séparé des valeurs finales des paramètres du modèle : pour un complément de calage ou pour une extension de données ;

- édition sur fichier séparé d'un tableau récapitulatif des paramètres hydrologiques, et éventuellement de fonte des neiges, de tous les bassins étudiés simultanément : pour une étude comparative : fichier TABLEAU.LST (tableau 1) ;

FICHIER RECAPITULATIF : TABLEAU.LST PARAMETRES DU MODELE

SIMULATION DU DEBIT A HAUCONCOURT DIFFERENTES HYPOTHESES

NUMERO	SURFACE KM2	DEB EXT M3/S	R POND	R NAT	COR PLU %	RES SUP MM	COR ETP %	RUI=PER MM	T1/2 MON MOIS	T1/2 TA1 MOIS	T1-->2 MOIS	T1/2 TA2 MOIS
1	1.000E+03	0.00	0.7856	0.9171	0.00	117.96	0.00	48.50	1.50	3.00	1000.00	10.00
2	1.000E+03	0.00	0.8073	0.9114	-6.07	100.00	0.00	53.90	1.50	3.00	1000.00	10.00
3	1.000E+03	0.00	0.7930	0.8958	0.00	100.00	11.65	58.38	1.50	3.00	1000.00	10.00
4	1.000E+03	0.00	0.8392	0.9353	-16.65	83.26	-20.51	53.84	1.50	3.00	1000.00	10.00
5	1.000E+03	0.00	0.8846	0.9101	-36.23	74.55	-51.99	40.32	1.50	3.00	1000.00	10.00
6	1.000E+03	0.00	0.8890	0.9198	-36.48	69.89	-52.53	34.60	2.60	3.09	1000.00	10.00
			correlat pondere	correlat. naturelle	correct de pluie	capacite en eau	correct d'ETP	equi-ruiss	percolat.	tarriss rapide	transfert profond	tarriss lent

FICHIER RECAPITULATIF : MINMAXMOY.LST CARACTERISTIQUES DE L AJUSTEMENT

SIMULATION DU DEBIT A HAUCONCOURT DIFFERENTES HYPOTHESES

NO	XMIN OBS	XMIN SIM	XMAX OBS	XMAX SIM	XMOY OBS	XMOY SIM	SIGM OBS	SIGM SIM	NBRE OBS
1	1.22	1.13	36.07	34.90	8.83	9.09	7.18	7.97	72
2	1.22	1.36	36.07	32.12	8.83	8.23	7.18	7.06	72
3	1.22	1.50	36.07	34.00	8.83	8.62	7.18	7.44	72
4	1.22	1.07	36.07	28.71	8.83	9.21	7.18	6.58	72
5	1.22	1.28	36.07	30.23	8.83	8.06	7.18	5.92	72
6	1.22	1.36	36.07	28.57	8.83	8.09	7.18	5.89	72
	debit minimal M3/S		debit minimal M3/S		debit moyen M3/S		ecart-type M3/S		

FICHIER RECAPITULATIF : MOYBILAN.LST BILAN MOYEN DU BASSIN

SIMULATION DU DEBIT A HAUCONCOURT DIFFERENTES HYPOTHESES

NO	PLUIE MM	ETR MM	PLE MM	QRAP MM	Q SO1 MM	Q SO2 MM	DIFF STO
1	814.4	527.1	287.2	147.6	139.3	0.0	-4.0
2	764.9	504.2	260.7	124.7	135.1	0.0	-3.1
3	814.4	541.4	273.0	129.1	142.9	0.0	-3.1
4	678.8	419.4	259.3	122.3	136.7	0.0	-3.2
5	519.3	267.6	251.7	123.4	130.9	0.0	-4.7
6	517.3	264.1	253.1	147.3	108.0	0.0	-3.6
	pluie corrigee	avec ETP corrigee	pluie efficace	debit rapide	debit lent	debit tres lent	difference de stockage en moyenne

TABLEAU 1 - Exemples de fichiers récapitulatifs : TABLEAU.LST ; MINMAXMOY.LST et MOYBILAN.LST

- édition sur fichier séparé des valeurs minimales, maximales et moyennes simulées et calculées : fichier MINMAXMOY.LST (tableau 1) ;

- édition sur fichier séparé des bilans annuels moyens : fichier MOYBILAN.LST (tableau 1).

15. CONCLUSION

Le modèle GARDENIA a déjà été appliqué à la simulation des débits de plus de 200 bassins versants dont certains sous des climats très variés (Alpes à 2000 mètres d'altitude, Bretagne, Vienne, Nord du Maroc). Une quarantaine de niveaux piézométriques ont également été simulés : dans la nappe de la Craie de Haute-Normandie, dans le Loiret, en Bretagne, etc... Il semble qu'un tel modèle puisse rendre des services intéressants, cependant comme tout modèle global il doit être manié avec beaucoup de précautions et une analyse de sensibilité des paramètres doit être réalisée à chaque fois que possible.

Il existe une version de ce modèle pour la simulation globale d'un système karstique : le modèle KARINE, et une version pour la simulation des transferts de nitrates vers un piézomètre ou une source : le modèle BICHE (note technique SGN/EAU n° 83/15).

BIBLIOGRAPHIE

CREUTIN (J.D.) 1979 .- Méthode d'interpolation optimale de champs hydrométéorologiques - Comparaison et application à une série d'épisodes pluvieux cévenols .- Thèse présentée à l'Université Scientifique et Médicale, et à l'Institut National Polytechnique de Grenoble - Grenoble, 1979

MERO (F.), 1979 .- The MOO8 hydrometeorological simulation system - Basic concepts and operator's guide .- Tel Aviv, 18 p., April 1978

ROSEMBROCK (H.H.), 1960 .- An automatic method for finding the greatest or the least value of a fonction .- Computer Journal 3.3., pp. 175-184, Oct. 1960

THIERY (D.), CAOUS (J.Y.), 1979 .- Application d'un modèle conceptuel de prévision d'étiages à la nappe de la Craie en Picardie .- Bur. Rech. Géol. Min. (B.R.G.M.), Orléans, rapp. inter. 79 SGN PIC, Octobre 1979

THIERY (D.), 1980 .- Simulation de bassins hydrologiques par modèles globaux - Le programme AMANDE .- Bur. Rech. Géol. Min. (B.R.G.M.) Orléans, rapp. inter. 80 SGN 192 HYD, mars 1980

THIERY (D.), 1983 .- Description du modèle BICHE .- Bur. Rech. Géol. et Min. (B.R.G.M.) Orléans, note technique interne SGN/EAU n° 83/15, 53 pages.

TURC (L.), 1961 .- Evaluation des besoins en eau d'irrigation - Evapotranspiration potentielle .- Ann. Agronomique, 1961-12

ANNEXES

ANNEXE 1

SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU MODELE

1. EQUATIONS DE VIDANGE

Le réservoir H est caractérisé par un temps de demi-vidange THG et par une hauteur caractéristique de ruissellement RUIPER.

Les réservoirs G1 et G2 sont caractérisés chacun par un temps de demi-vicange TG1 et TG2.

Les équations de vidange sont les suivantes :

$$\frac{d\,G1}{dt} = - G1 / tg1$$

$$\frac{d\,G2}{dt} = - G2 / tg2$$

$$\frac{d\,H}{dt} = - H / thg - H / (thg.RUIPER/H)$$

2. RESERVOIRS G1 ET G2

Le débit instantané est :

$$qg = - \frac{d\,G}{dt}$$

or la solution évidente de l'équation différentielle est :

$$G = G_o\, e^{-t/tg}$$

d'où

$$qg = \frac{G_o}{tg}\, e^{-t/tg}$$

Soit QG le volume total écoulé pendant un pas de temps, c'est-à-dire entre les temps t et t+1 :

$$QG = \int_t^{t+1} qg(\tau)\, d\tau = \int_t^{t+1} \frac{G_o}{tg} e^{-\tau/tg}\, d\tau$$

$$= \frac{G_o}{tg} x - tg \left[e^{-\tau/tg}\right]_t^{t+1} = G_o\, e^{-t/tg} \left[1 - e^{-1/tg}\right]$$

d'où $QG = G(t) / TGM$

en posant $1 / TGM = 1 - e^{-1/tg}$

soit $TGM = 1 / 1 - e^{-1/tg}$

La constante de temps tg de l'exponentielle est reliée au temps de demi-vidange TG par :

$$G_o/2 = G_o\, e^{-TG/tg}$$

d'où $tg = TG / Ln\ 2$ (Ln = logarithme népérien)

Soit en remplaçant tg par sa valeur, la relation suivante entre TG (temps de demi-vidange) et TGM (constante de temps du modèle) :

$$\boxed{TGM = 1 / \left[1 - e^{-(Ln\ 2)/TG}\right]}$$

relation valable pour G1 et G2.

3. RESERVOIR H

Il se vidange simultanément :

- non linéairement :

$$dH / dt = - H / (thg . RUIPER/H)$$

- linéairement vers G1 :

$$dH / dt = - H / thg$$

La vidange non linéaire est du type : $dH = H / T$, avec $T = k / H$ c'est-à-dire que la vidange est d'autant plus rapide que la hauteur H est élevée et d'autant plus lente que le réservoir se tarit.

La hauteur RUIPER est la hauteur de H pour laquelle les deux vidanges (percolation et écoulement rapide) sont égales :

- quand $H \gg RUIPER$, l'écoulement rapide est prépondérant,

- quand $H \ll RUIPER$, la percolation est prépondérante et il n'y a pratiquement plus d'écoulement rapide.

Pour supprimer l'écoulement rapide, il suffit donc d'imposer une très forte valeur de RUIPER (par exemple 10000 mm).

Solution analytique.

$$\frac{dH}{dt} = - \left(\frac{H2}{thg . RUIPER} + \frac{H}{thg} \right)$$

$$\frac{d H}{1 / thg.RUIPER \quad (H + RUIPER/2)^2 - RUIPER^2/4} = - dt$$

d'où la solution immédiate :

$$H = \frac{C \cdot RUIPER\ e^{-t/thg}}{1 - C\ e^{-t/thg}}$$

En posant les notations suivantes :

$H_o = H\ (t = 0)$

$H' = H / H_o$

$t' = t / thg$

on obtient :

$$H_o = \frac{C \cdot RUIPER}{1 - C}$$

d'où $C = 1 / (1 + RUIPER/H_o)$

$$H' = \frac{(1 - C)\ e^{-t'}}{1 - C\ e^{-t'}}$$

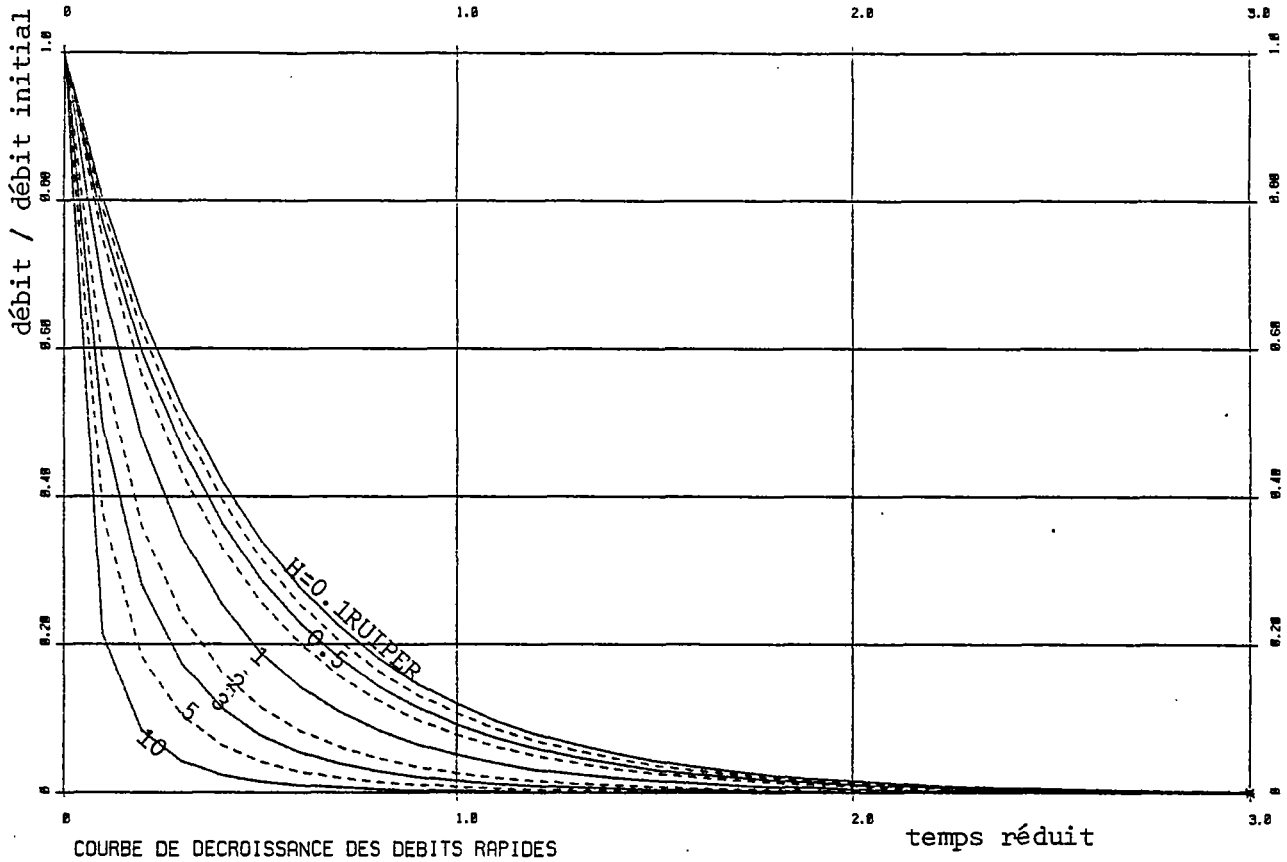
4. ILLUSTRATION DE LA COURBE DE CROISSANCE DES DEBITS SORTANT DU RESERVOIR H

$$QH = H^2 / (thg \cdot RUIPER)$$

$$QH = \frac{C^2 \cdot RUIPER}{thg} \cdot \frac{e^{-2t'}}{(1 - c\ e^{-t'})^2}$$

En appelant Qo le débit au temps initial, on obtient :

$$\frac{QH}{QO} = Q' = \frac{1 - C^2}{(1 - C\ e^{-t/thg})^2}\ e^{-2t/thg}$$



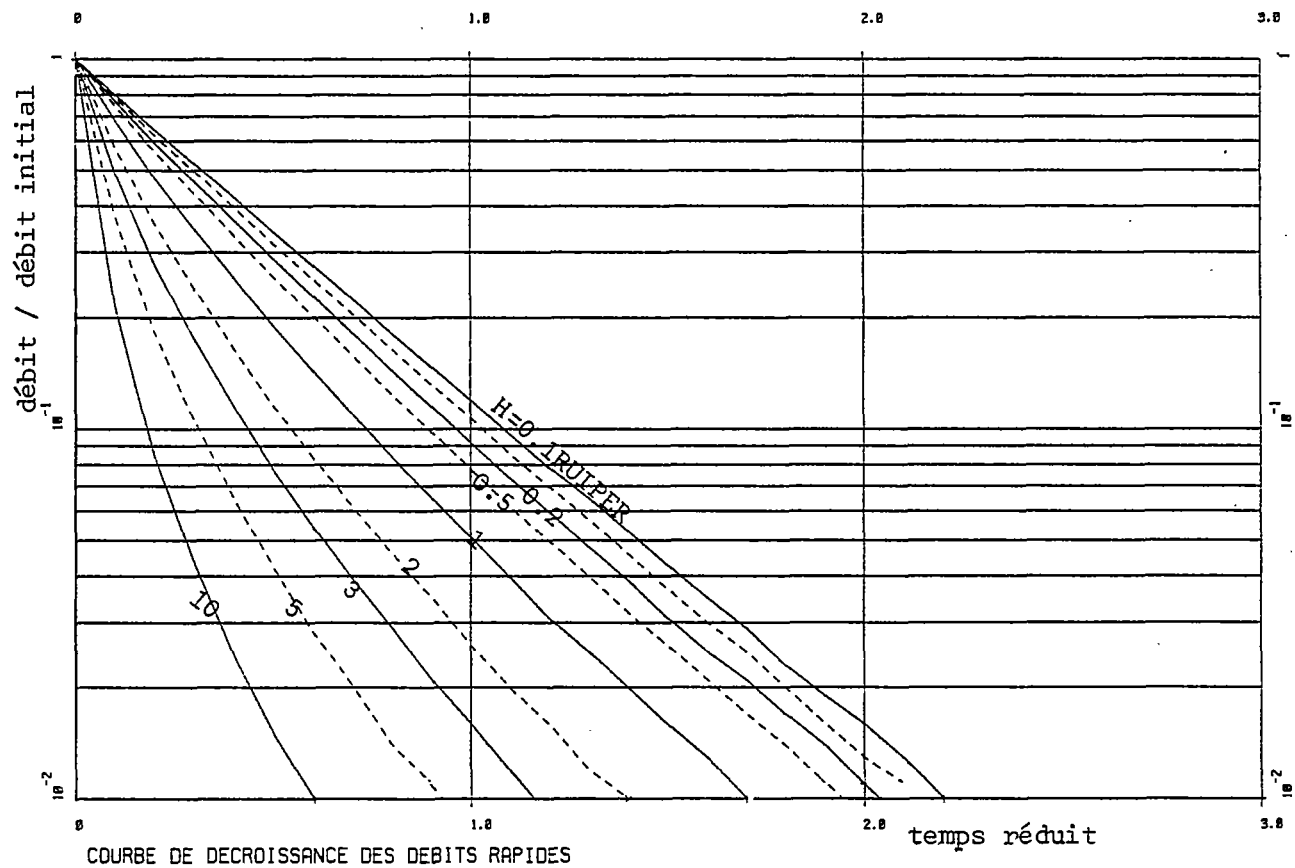


FIGURE I.1 - Courbe de décroissance (non linéaire) des débits sortant du réservoir H en fonction de la hauteur initiale

A titre d'illustration, on a tracé sur les graphiques I.1 et I.2, les courbes d'évolution de Q' en fonction de la valeur initiale du niveau Ho. Les courbes ont été calculées pour 9 valeurs : de Ho = 0.1 RUIPER (courbe la plus haute ayant la décroissance la plus lente) à Ho = 10 RUIPER (courbe ayant la décroissance la plus rapide).

La non-linéarité est évidente : plus la crue est forte, plus la décroissance est rapide.

5. DEBITS SORTANT DU RESERVOIR H

Débit rapide : $QR = - H^2 / (thg \cdot RUIPER)$

Infiltration : $QI = - H / RUIPER$

On obtient donc : $QR / QI = H / RUIPER$

6. MISE EN EQUILIBRE DANS LE RESERVOIR H

On suppose un flux d'alimentation constant PLUEF (pluie efficace) par unité de temps :

$$\frac{dH}{dt} = PLUEF - \frac{H}{thg} - \frac{H^2}{RUIPER \cdot thg}$$

a) A l'équilibre dH/dt = 0, on obtient donc la solution particulière par l'équation :

$$\frac{H}{thg} + \frac{H^2}{RUIPER \cdot thg} - PLUEF = 0$$

d'où $$H_e = RUIPER \left(\sqrt{1 + 4\ PLUER.thg/RUIPER} - 1 \right)$$

b) En régime transitoire (équation homogène) :

$$\frac{dH}{dt} = - \frac{H}{thg} \left(1 + \frac{H}{RUIPER} \right)$$

d'où $$H = \frac{K\ e^{-t/thg}}{1 - K/RUIPER\ e^{-t/thg}} + He$$

ANNEXE 2

EXEMPLES D'APPLICATION

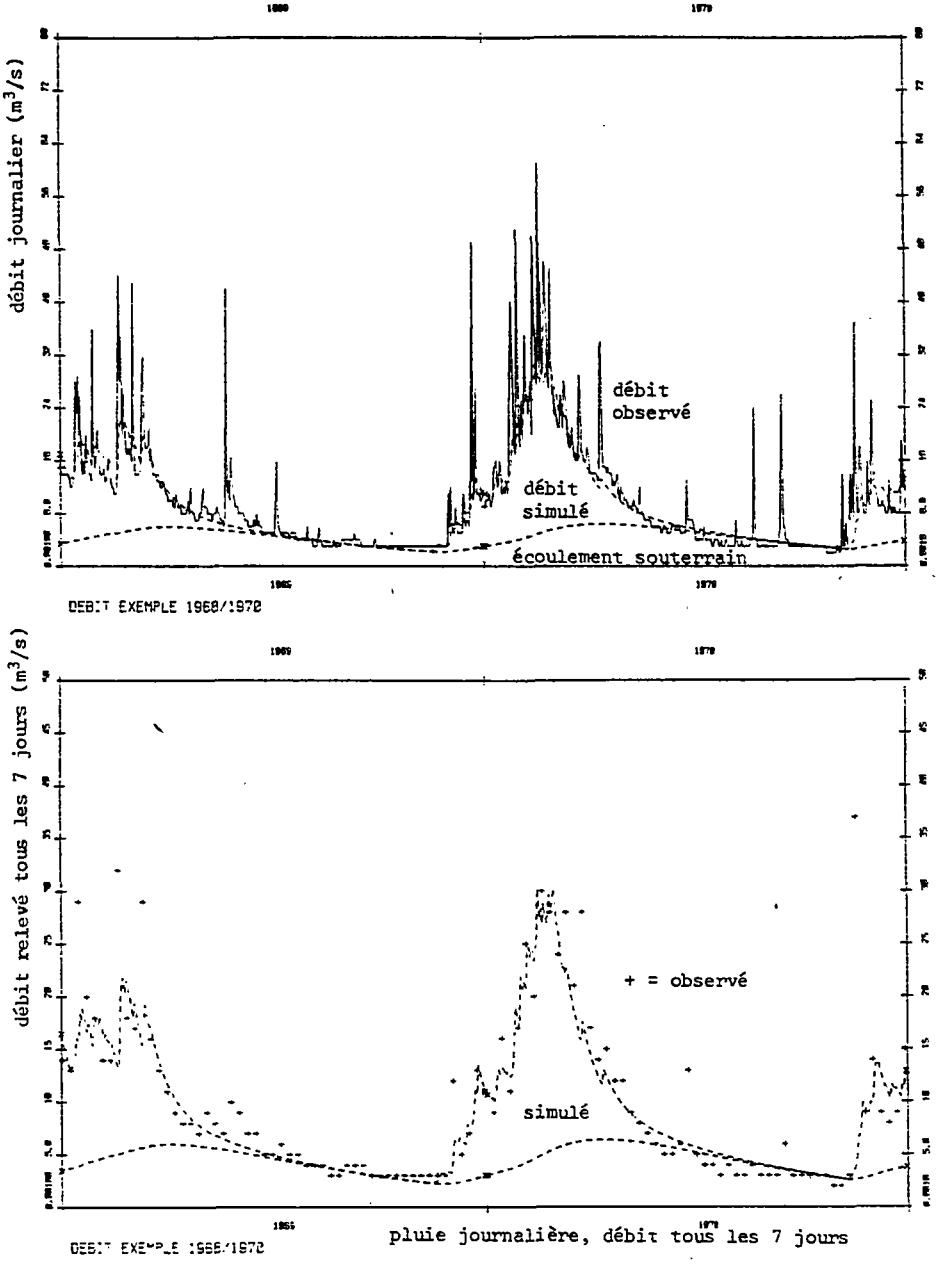


FIGURE II.1 - Simulation des débits journaliers

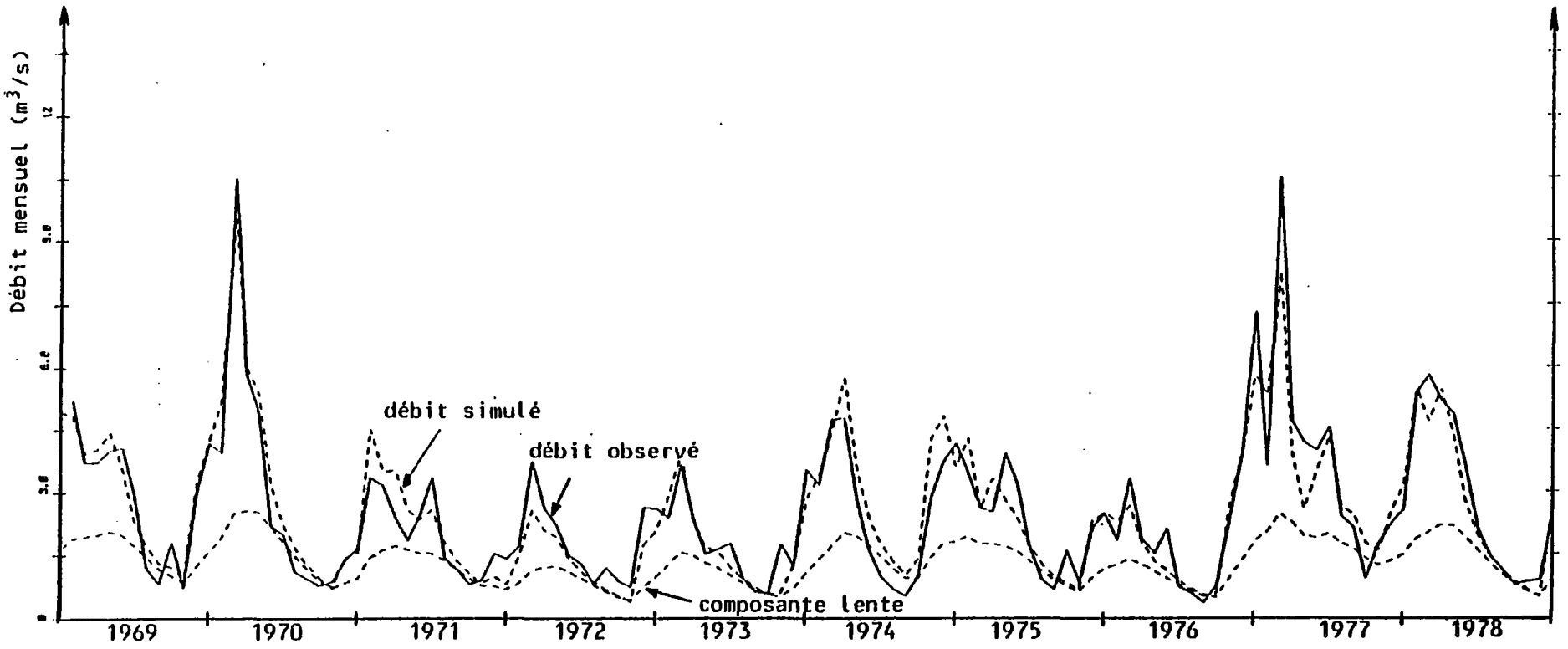


FIGURE II.2 - Simulation du débit mensuel d'un bassin versant de 140 km² à partir des pluies mensuelles

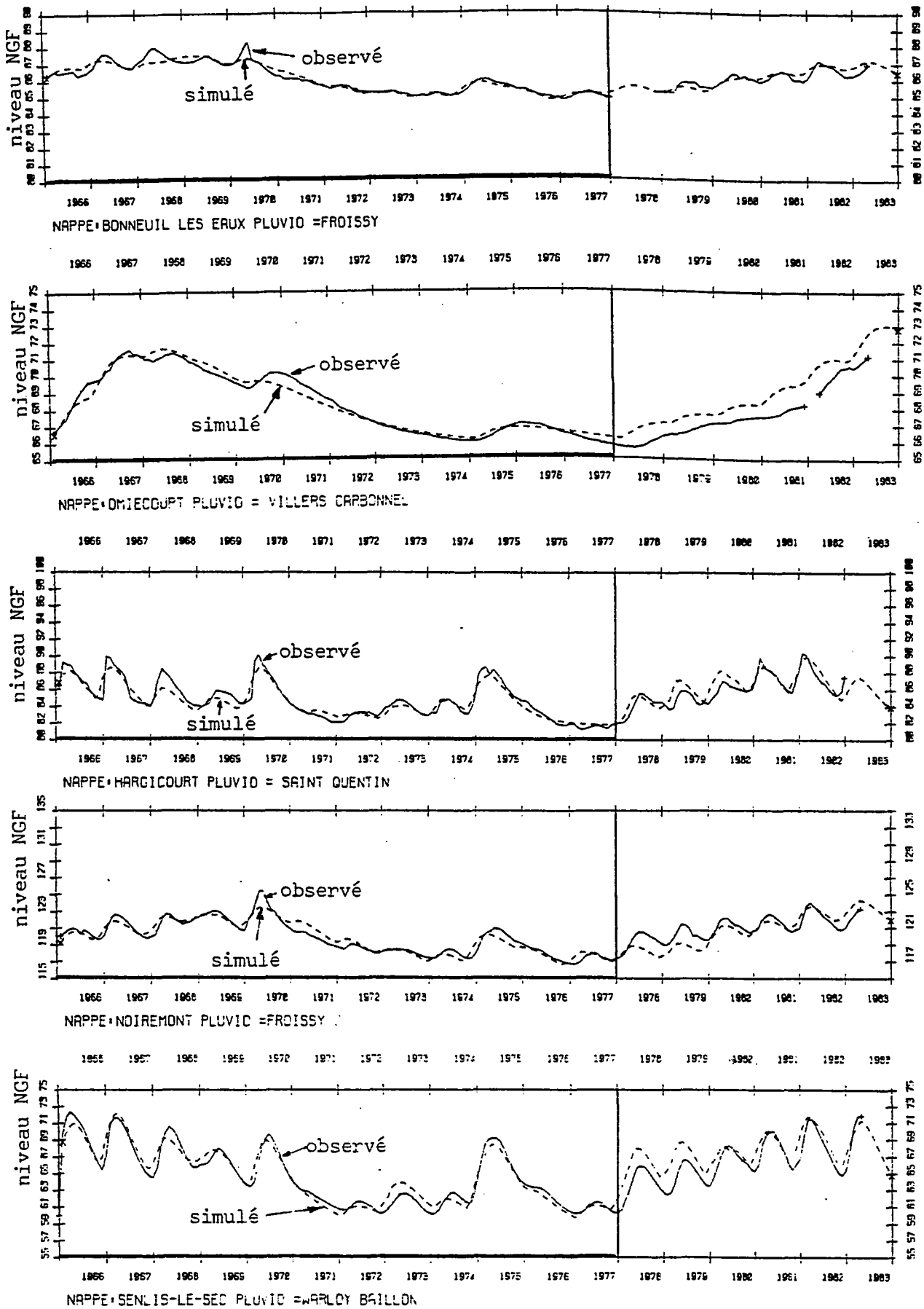

niveau NGF
observé
simulé
1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983
NAPPE: BONNEUIL LES EAUX PLUVIO =FROISSY
NAPPE: OMIECOURT PLUVIO = VILLERS CARBONNEL
NAPPE: HARGICOURT PLUVIO = SAINT QUENTIN
NAPPE: NOIREMONT PLUVIO =FROISSY
NAPPE: SENLIS-LE-SEC PLUVIO =WARLOY BAILLON

FIGURE II.3 - Simulation des niveaux piézométriques

ANNEXE 3

BORDEREAUX DE DONNEES

PROGRAME GARDENIA

UTILISATEUR: DATE: ETUDE:

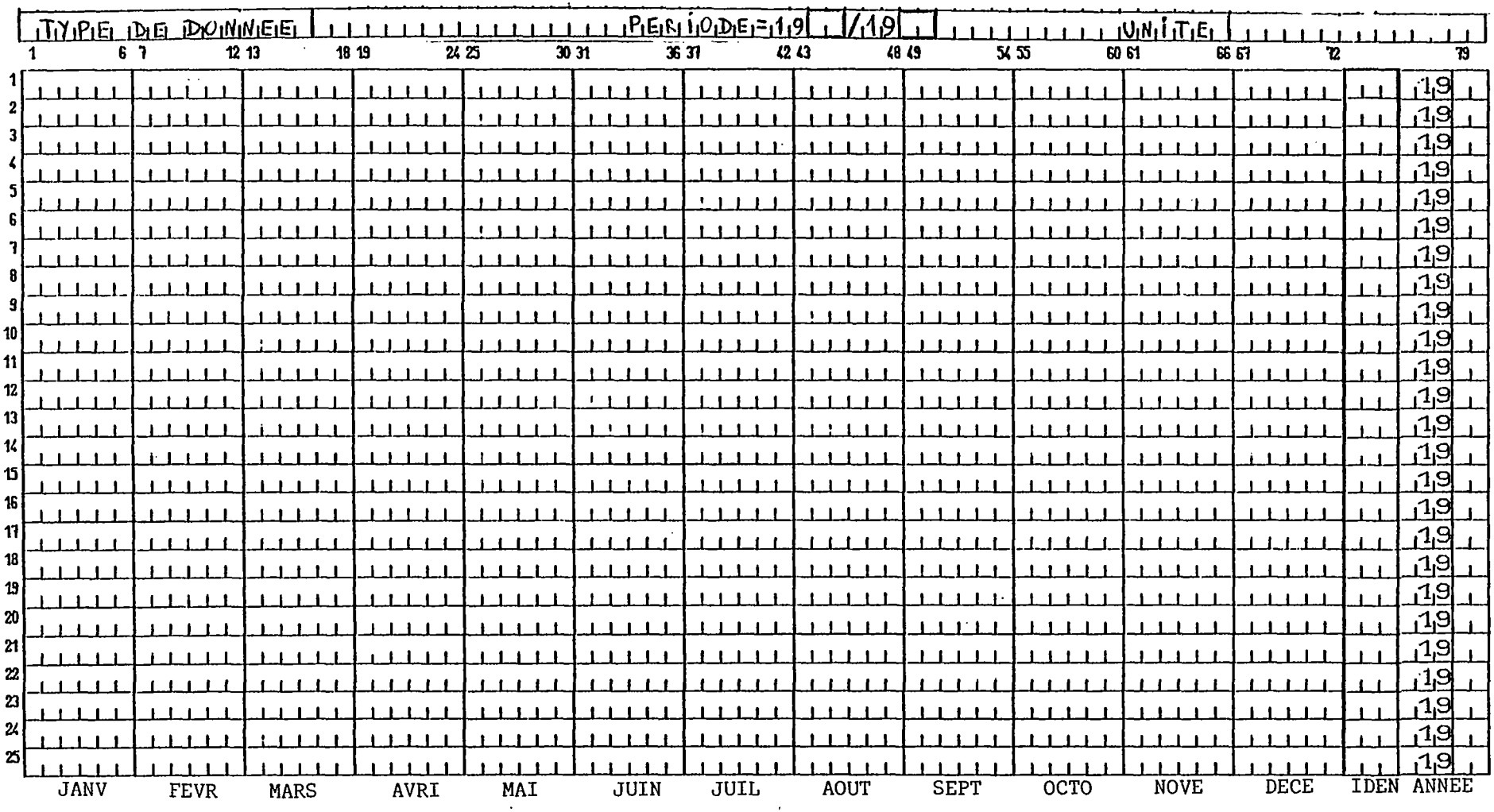

TYPE DE DONNEE
PERIODE=19 /19
UNITE
1 6 7 12 13 18 19 24 25 30 31 36 37 42 43 48 49 54 55 60 61 66 67 72 79
JANV FEVR MARS AVRI MAI JUIN JUIL AOUT SEPT OCTO NOVE DECE IDEN ANNEE

FIGURE III.1 - Bordereau pour des données pentadaires, décadaires ou mensuelles

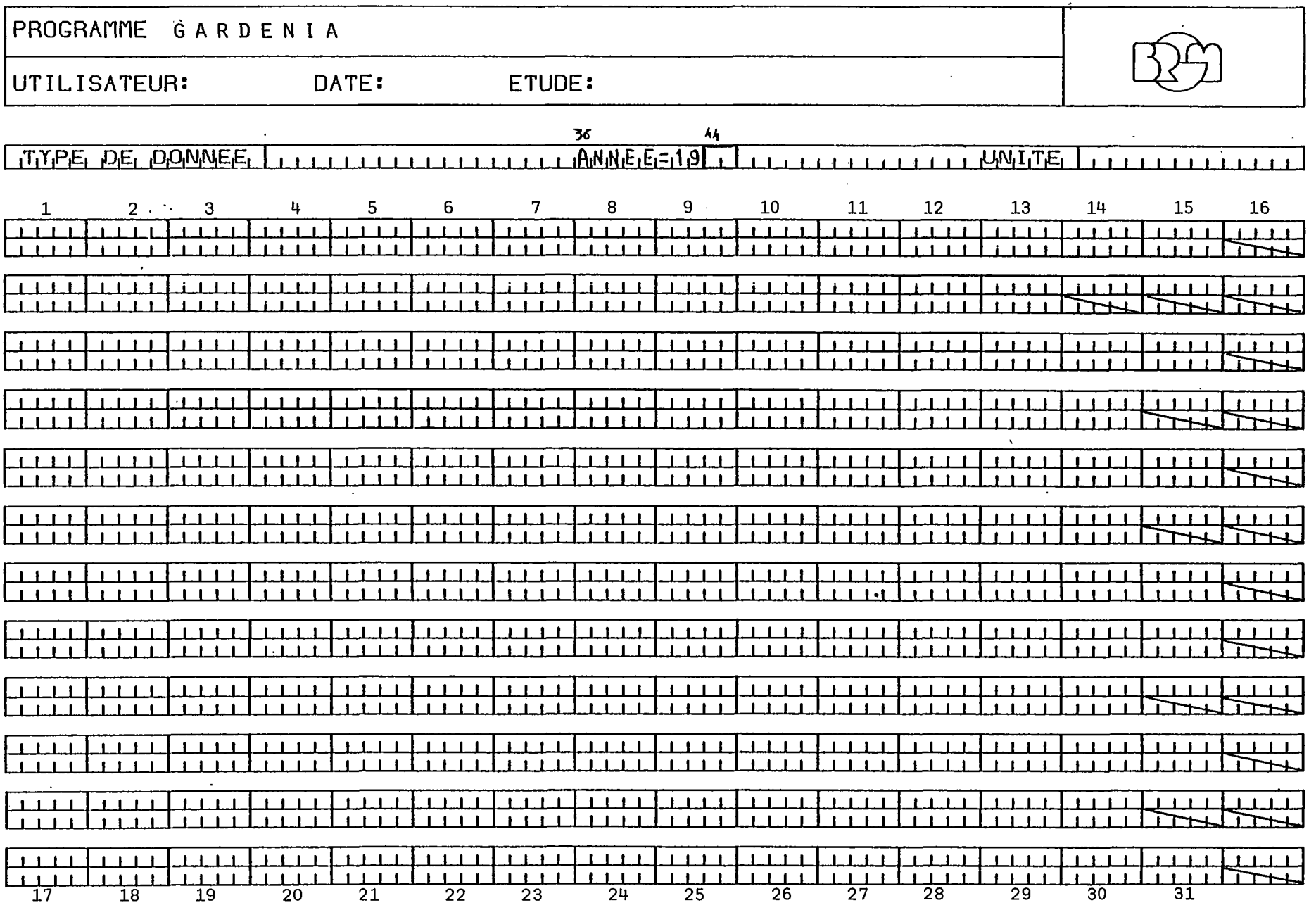


FIGURE III.2 - Bordereau pour des données journalières

FIGURE III.3 - Bordereau de données journalières séquentielles

TYPE DE DONNEES (2) ANNEE=19 (36) (44) UNITE= (61)

JANV (1)	FEVR (7)	MARS (13)	AVRIL (19)	MAI (25)	JUIN (31)	JUIL (37)	AOUT (43)	SEPT (49)	OCTO (55)	NOVE (61)	DECE (67) (72)	(74)
												01
												02
												03
												04
												05
												06
												07
												08
												09
												10
												11
												12
												13
												14
												15
												16
												17
												18
												19
												20
												21
												22
												23
												24
												25
												26
												27
												28
												29
	X		X		X			X		X		30
												31

TABLEAU III.4 - Exemple de données hydroclimatiques

TYPE DE DONNEE PLUIE MENSUELLE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES

115.0	132.2	24.2	75.9	81.2	57.3	41.3	33.1	102.5	127.6	77.6	125.6	1968
95.2	106.4	71.4	44.4	121.6	28.5	69.2	50.5	25.4	3.3	159.3	116.0	1969
128.4	165.6	81.1	78.8	25.5	33.9	53.5	71.7	120.2	34.1	109.5	86.8	1970

TYPE DE DONNEE PLUIE DECADAIRE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES

90.6	11.4	12.0	48.0	41.2	43.0	0.5	21.7	3.0	23.1	15.6	36.4	1968	1
40.3	3.9	36.9	9.7	10.8	36.8	13.7	27.6	0.1	24.2	8.7	0.5	1968	2
16.4	57.2	28.7	42.1	61.0	25.9	52.4	2.6	21.1	1.5	52.9	71.2	1968	3
11.8	53.4	30.0	25.9	36.2	44.3	31.8	31.4	8.2	10.1	14.5	19.7	1969	1
30.7	23.0	67.9	1.1	20.0	7.4	66.6	1.3	1.3	29.1	10.6	10.8	1969	2
0.4	9.8	15.2	0.0	2.6	0.7	65.9	72.6	20.8	45.9	34.4	35.7	1969	3
32.1	24.6	71.7	53.8	62.5	49.3	35.0	14.0	32.1	27.4	30.6	20.8	1970	1
9.4	16.0	0.0	0.0	8.2	25.7	17.9	20.0	15.6	23.7	32.1	15.9	1970	2
18.0	13.2	4.0	27.1	3.1	3.8	64.0	82.6	42.9	35.4	20.9	30.5	1970	3

TYPE DE DONNEE PLUIE PENTADAIRE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES

35.5	55.1	8.8	2.6	0.3	12.7	19.0	29.0	38.0	3.6	42.5	0.0	1968	1
0.0	0.5	6.5	12.0	4.8	0.5	24.0	0.0	1.4	11.9	4.8	33.8	1968	2
13.7	26.7	1.6	2.3	35.7	1.2	7.0	2.7	9.0	0.9	25.2	12.4	1968	3
0.1	13.6	27.4	0.2	0.0	0.1	0.3	23.9	5.7	3.0	0.1	0.1	1968	4
16.5	0.2	19.3	37.5	8.7	20.3	0.0	40.9	58.9	3.3	2.2	22.2	1968	5
40.1	13.7	1.7	1.0	15.2	5.9	1.1	0.4	15.9	36.9	69.2	2.2	1968	6
3.3	8.5	31.2	22.3	9.5	20.5	14.5	11.4	8.5	27.7	35.8	8.5	1969	1
12.2	19.6	24.5	6.8	1.4	6.8	0.0	10.1	2.4	12.1	16.5	3.3	1969	2
24.9	5.8	15.9	7.1	50.8	17.1	1.1	0.0	3.0	17.0	7.3	0.1	1969	3
37.9	28.7	0.0	1.3	0.1	1.2	26.7	2.4	10.2	0.4	9.8	1.0	1969	4
0.4	0.0	1.1	8.7	1.7	13.5	0.0	0.0	2.4	0.2	0.7	0.0	1969	5
6.5	59.4	39.7	32.9	12.8	8.0	38.8	7.1	19.2	15.2	35.2	0.5	1969	6
8.6	23.5	15.7	8.9	39.7	32.0	25.3	28.5	39.7	22.8	28.0	21.3	1970	1
10.1	24.9	2.7	11.3	21.5	10.6	3.7	23.7	16.1	14.5	15.5	5.2	1970	2
0.9	8.6	16.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	5.7	16.7	9.0	1970	3
1.9	16.0	3.8	16.2	7.7	7.9	17.4	6.4	7.3	24.9	14.9	0.9	1970	4
5.4	12.7	97.9	0.3	0.0	4.0	14.8	12.4	0.6	2.5	1.8	2.1	1970	5
38.6	25.4	41.8	40.9	25.9	16.9	31.8	3.6	4.5	16.4	5.6	24.9	1970	6

TYPE DE DONNEE PLUIE MENSUELLE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES CAS NO 1

115.0	132.2	24.2	75.9	81.2	57.3	41.3	33.1	102.5	127.6	77.6	125.6	1968
95.2	106.4	71.4	44.4	121.6	28.5	69.2	50.5	25.4	3.3	159.3	116.0	1969
128.4	165.6	81.1	78.8	25.5	33.9	53.5	71.7	120.2	34.1	109.5	86.8	1970

TYPE DE DONNEE PLUIE MENSUELLE EXEMPLE 1968/70 UNITE MILLIMETRES CAS NO 2

115.0	132.2	24.2	75.9	81.2	57.3	41.3	33.1	102.5	127.6	77.6	125.6	1968
95.2	106.4	71.4	44.4	121.6	28.5	69.2	50.5	25.4	3.3	159.3	116.0	1969
128.4	165.6	81.1	78.8	25.5	33.9	53.5	71.7	120.2	34.1	189.5	86.8	1970

ANNEXE 4

5 EXEMPLES DE JEUX DE PARAMETRES

```
 1  DEBIT MENSUEL SIMULE AVEC DES PLUIES MENSUELLES * 1 SEUL CAS AVEC BORNES *
 2   1 NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES
 3  0=DEBITS, 1=CHARGES                          : 0
 4  SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES                : 1
 5  STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES                : 0
 6  STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES               : 0
 7  IMPRESSION DU BILAN 0=PAS  1=ANN  2=MEN:     0
 8  ANALYSE DES PLUIES EFFICACES                 : 0
 9  ANALYSE DES VALEURS CALCULEES                : 0
10  ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE. 2=SUPPRIM):    2
11  DESSIN SUR IMPRIMANTE                        : 0
12  DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION            : 0
13  DESSIN SUR TABLE TRAC.  1=OUI; 2=DETAILS:    2
14  FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES         : 1
15  INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2 ..)       : 2
16   ********** FICHIER PLUIE       **********
17         PAS DE TEMPS DES DONNEES
18     0=JOURN   1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS.      : 3 <------ mensuel
19         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
20     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
21   ********** FICHIER TEMPERATURE**********
22         PAS DE TEMPS DES DONNEES
23     0=JOURN.  1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS.      : 0
24         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
25     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
26   ********** FICHIER ETP         **********
27         PAS DE TEMPS DES DONNEES
28     0=JOURN.  1=PENTA   2=DECA.  3=MENS.      : 3
29         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
30     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
31   ********** FICHIER OBSERVAT.   **********
32         PAS DE TEMPS DES DONNEES
33     0=JOURN.  1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS.      : 3
34         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
35     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
36  ************************************************
37  ************************************************
38  DEBIT EXEMPLE 1968/1970
39  VALEUR    MAXIMALE                           :  50 00000
40  VALEUR    MINIMALE                           :   0.00100
41  LARGEUR DU DESSIN                            :  16.00000
42  HAUTEUR  DU DESSIN                           :  10.00000
43  ************************************************
44  NOMBRE ANNEES  DONNEES POUR LES ENTREES:     3
45  NOMBRE ANNEES  DEMARRAGE <0 SI ABSENTES:     1
46  DATE PREMIERE ANNEE DE  SIMULATION      : 1968
47  NOMBRE ANNEES DE PREVISION              :    0
48  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES)   :    0
49  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP)      :    0
50  NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS           :   70
51  DUREE DES PLUIES EN MOY. PAR PAS (%)    :  100
52  OPTION SOUT. 2.2 RES. 0.1:1 RES.  3 SEUIL:   1
53  OPTION  =1  SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE:     0
54  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES       (%):  -0 36599 OPTIMISATION DU PARA1
55  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.      (MM): 108 81214 OPTIMISATION DU PARA1
56  COEF. DE CORRECTION DE L ETP         (%):   8.65398 OPTIMISATION DU PARA1
57  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM): 133 28835 OPTIMISATION DU PARA1
58  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL       (MOIS):   1 99986 OPTIMISATION DU PARA1
59  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.  (MOIS):   3 07931 OPTIMISATION DU PARA1
60  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1. -->2. (MOIS):   0 50000 OPTIMISATION DU PARA0
61  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2.  (MOIS):   0 50000 OPTIMISATION DU PARA0
62  DEBIT EXTERIEUR                   (M3/S):   0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
63  SURFACE DU BASSIN VERSANT          (KM2): 7.000E+02 OPTIMISATION DU PARA0


64  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES       (%)  INF= -25 00000 SUP=  25.00000
65  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.      (MM)  INF=   0.00100 SUP= 200.00000
66  COEF. DE CORRECTION DE L ETP         (%)  INF= -25 00000 SUP=  25.00000
67  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM)  INF=   0.00100 SUP=9999.00000
68  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL       (MOIS). INF=   0.15000 SUP=   2 00000
69  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.  (MOIS)  INF=   0 15000 SUP=   5.00000
70  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1 -->2   (MOIS). INF=   0.15000 SUP=  50.00000
71  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2   (MOIS). INF=   0 15000 SUP=  50 00000
72  ************************************************
73  ************************************************
```

bornes

TABLEAU IV.1 - Pluies mensuelles ; un seul cas avec bornes pour pour les paramètres

```
 1  DEBIT MENSUEL SIMULE AVEC DES PLUIES JOURNALIERES
 2   1 NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES
 3  0=DEBITS, 1=CHARGES                          : 0
 4  SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES                : 1
 5  STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES                : 0
 6  STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES               : 0
 7  IMPRESSION DU BILAN 0=PAS  1=ANN  2=MEN:  0
 8  ANALYSE DES PLUIES EFFICACES                 : 0
 9  ANALYSE DES VALEURS CALCULEES                : 0
10  ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE. 2=SUPPRIM):  2
11  DESSIN SUR IMPRIMANTE                        : 0
12  DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION            : 0
13  DESSIN SUR TABLE TRAC.  1=OUI; 2=DETAILS:  0
14  FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES    : 1
15  INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2...) : 2
16   ********** FICHIER PLUIE      **********
17         PAS DE TEMPS DES DONNEES
18    0=JOURN   1=PENTA   2=DECA.  3=MENS     : 0 <------ journalier
19         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
20    0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE           : 0
21   ********** FICHIER TEMPERATURE**********
22         PAS DE TEMPS DES DONNEES
23    0=JOURN.  1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS.    : 0
24         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
25    0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE           : 0
26   ********** FICHIER ETP          **********
27         PAS DE TEMPS DES DONNEES
28    0=JOURN   1=PENTA   2=DECA.  3=MENS.    : 3
29         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
30    0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE           : 0
31   ********** FICHIER OBSERVAT.  **********
32         PAS DE TEMPS DES DONNEES
33    0=JOURN   1=PENTA   2=DECA.  3=MENS.    : 3
34         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
35    0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE           : 0
36  ************************************************
37  ************************************************
38  DEBIT EXEMPLE 1968/1970
39  VALEUR   MAXIMALE                        :  50.00000
40  VALEUR   MINIMALE                        :   0.00100
41  LARGEUR DU DESSIN                        :  16.00000
42  HAUTEUR  DU DESSIN                       :  10.00000
43  ************************************************
44  NOMBRE ANNEES  DONNEES POUR LES ENTREES:     3
45  NOMBRE ANNEES  DEMARRAGE <0 SI ABSENTES:     1
46  DATE PREMIERE ANNEE DE  SIMULATION      : 1968
47  NOMBRE ANNEES DE PREVISION              :    0
48  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES)   :    0
49  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP)      :    0
50  NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS           :   70
51  DUREE DES PLUIES EN MOY. PAR PAS (%)    :  100
52  OPTION SOUT. 2:2 RES. 0,1:1 RES.  3:SEUIL:    1
53  OPTION  =1  SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE:    0
54  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES      (%):  -2.06947 OPTIMISATION DU PARA1
55  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.     (MM):  90.14375 OPTIMISATION DU PARA1
56  COEF. DE CORRECTION DE L ETP        (%):  19.33300 OPTIMISATION DU PARA1
57  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM):  77.86873 OPTIMISATION DU PARA1
58  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL      (MOIS):   1.86795 OPTIMISATION DU PARA1
59  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1. (MOIS):   3.48808 OPTIMISATION DU PARA1
60  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1. -->2 (MOIS):   0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
61  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2  (MOIS):   0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
62  DEBIT EXTERIEUR                  (M3/S):   0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
63  SURFACE DU BASSIN VERSANT         (KM2): 7.000E+02 OPTIMISATION DU PARA0


64  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES      (%): INF= -25.00000 SUP=  25.00000
65  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.     (MM): INF=   0.00100 SUP= 200.00000
66  COEF. DE CORRECTION DE L ETP        (%): INF= -25.00000 SUP=  25.00000
67  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM) INF=   0.00100 SUP=9999.00000
68  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL      (MOIS): INF=   0.15000 SUP=   2.00000
69  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1  (MOIS) INF=   0.15000 SUP=   5.00000
70  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1 -->2  (MOIS) INF=   0.15000 SUP=  50.00000
71  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2  (MOIS). INF=  0.15000 SUP=  50.00000
72  ************************************************
73  ************************************************
```

TABLEAU IV.2 - Pluies journalières (un seul cas avec bornes)

```
 1  DEBIT MENSUEL SIMULE AVEC DES PLUIES MENSUELLES * EXEMPLE SANS BORNES DES PARAMETRES *
 2   1 NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES
 3  0=DEBITS, 1=CHARGES                          : 0
 4  SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES                : 1
 5  STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES                : 0
 6  STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES               : 0
 7  IMPRESSION DU BILAN 0=PAS  1=ANN  2=MEN:  0
 8  ANALYSE DES PLUIES EFFICACES                 : 0
 9  ANALYSE DES VALEURS CALCULEES                : 0
10  ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE. 2=SUPPRIM):  2
11  DESSIN SUR IMPRIMANTE                        : 0
12  DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION            : 0
13  DESSIN SUR TABLE TRAC.  1=OUI; 2=DETAILS:  0
14  FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES         : 0
15  INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2...) : 2
16   ********** FICHIER PLUIE      **********
17          PAS DE TEMPS DES DONNEES
18     0=JOURN.  1=PENTA   2=DECA.  3=MENS.    : 3
19          TYPE DE FORMAT DE LECTURE
20     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE            : 0
21   ********** FICHIER TEMPERATURE**********
22          PAS DE TEMPS DES DONNEES
23     0=JOURN.  1=PENTA . 2=DECA.  3=MENS.    : 0
24          TYPE DE FORMAT DE LECTURE
25     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE            : 0
26   ********** FICHIER ETP        **********
27          PAS DE TEMPS DES DONNEES
28     0=JOURN.  1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS.    : 3
29          TYPE DE FORMAT DE LECTURE
30     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE            : 0
31   ********** FICHIER OBSERVAT.  **********
32          PAS DE TEMPS DES DONNEES
33     0=JOURN.  1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS.    : 3
34          TYPE DE FORMAT DE LECTURE
35     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE            : 0
36  ************************************************
37  ************************************************
38  DEBIT EXEMPLE 1968/1970
39  VALEUR   MAXIMALE                        :  50.00000
40  VALEUR   MINIMALE                        :   0.00100
41  LARGEUR DU DESSIN                        :  16.00000
42  HAUTEUR  DU DESSIN                       :  10.00000
43  ************************************************
44  NOMBRE ANNEES  DONNEES POUR LES ENTREES:    3
45  NOMBRE ANNEES  DEMARRAGE <0 SI ABSENTES:    1
46  DATE PREMIERE ANNEE DE  SIMULATION      : 1968
47  NOMBRE ANNEES DE PREVISION              :    0
48  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES)   :    0
49  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP)      :    0
50  NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS           :   70
51  DUREE DES PLUIES EN MOY. PAR PAS (%)    :  100
52  OPTION SOUT. 2:2 RES. 0, 1:1 RES.  3:SEUIL:    1
53  OPTION  =1  SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE:    0
54  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES      (%):  -0.36599 OPTIMISATION DU PARA1
55  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.     (MM): 108.81214 OPTIMISATION DU PARA1
56  COEF. DE CORRECTION DE L ETP        (%):   8.65398 OPTIMISATION DU PARA1
57  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM). 133.28835 OPTIMISATION DU PARA1
58  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL.     (MOIS):   1.99988 OPTIMISATION DU PARA1
59  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1. (MOIS):   3.07931 OPTIMISATION DU PARA1
60  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1. -->2. (MOIS):  0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
61  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2. (MOIS):   0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
62  DEBIT EXTERIEUR                  (M3/S):   0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
63  SURFACE DU BASSIN VERSANT         (KM2): 7.000E+02 OPTIMISATION DU PARA0

64  ************************************************
65  ************************************************
```

TABLEAU IV.3 - Pluies mensuelles - Pas de bornes pour les paramètres (à déconseiller)

```
 1  DEBIT MENSUEL AVEC PLUIE MENSUELLE * ET AVEC FONTE DE LA NEIGE *
 2   1 NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES
 3  0=DEBITS, 1=CHARGES                          : 0
 4  SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES                : 1
 5  STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES                : 0
 6  STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES               : 0
 7  IMPRESSION DU BILAN 0=PAS  1=ANN  2=MEN:  0
 8  ANALYSE DES PLUIES EFFICACES                 : 0
 9  ANALYSE DES VALEURS CALCULEES                : 0
10  ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE. 2=SUPPRIM):  2
11  DESSIN SUR IMPRIMANTE                        : 0
12  DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION            : 0
13  DESSIN SUR TABLE TRAC.  1=OUI; 2=DETAILS:  0
14  FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES         : 1
15  INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2...) : 2
16   ********** FICHIER PLUIE       **********
17         PAS DE TEMPS DES DONNEES
18     0=JOURN.   1=PENTA.   2=DECA.   3=MENS.    : 3
19         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
20     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
21   ********** FICHIER TEMPERATURE**********
22         PAS DE TEMPS DES DONNEES
23     0=JOURN    1=PENTA    2=DECA.   3=MENS.    : 3
24         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
25     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
26   ********** FICHIER ETP         **********
27         PAS DE TEMPS DES DONNEES
28     0=JOURN.   1=PENTA.   2=DECA.   3=MENS.    : 3
29         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
30     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
31   ********** FICHIER OBSERVAT.   **********
32         PAS DE TEMPS DES DONNEES
33     0=JOURN.   1=PENTA    2=DECA.   3=MENS.    : 3
34         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
35     0= SEQUENTIEL     1= MULTIPLE             : 0
36  ************************************************
37  ************************************************
38  DEBIT EXEMPLE 1968/1970
39  VALEUR    MAXIMALE                           :   50.00000
40  VALEUR    MINIMALE                           :    0.00100
41  LARGEUR DU DESSIN                            :   16.00000
42  HAUTEUR  DU DESSIN                           :   10.00000
43  ************************************************
44  NOMBRE ANNEES  DONNEES POUR LES ENTREES:      3
45  NOMBRE ANNEES  DEMARRAGE <0 SI ABSENTES:      1
46  DATE PREMIERE ANNEE DE  SIMULATION      : 1968
47  NOMBRE ANNEES DE PREVISION               :    0
48  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES)    :    0
49  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP)       :    0
50  NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS            :    2
51  DUREE DES PLUIES EN MOY. PAR PAS (%)     :  100
52  OPTION SOUT. 2:2 RES. 0,1:1 RES.  3:SEUIL:    1
53  OPTION  =1  SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE:      0
54  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES       (%):   -0.36599 OPTIMISATION DU PARA1
55  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.      (MM):  108.91214 OPTIMISATION DU PARA1
56  COEF. DE CORRECTION DE L ETP         (%):    8.65398 OPTIMISATION DU PARA1
57  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM):  133.28835 OPTIMISATION DU PARA1
58  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL.      (MOIS):    1.99988 OPTIMISATION DU PARA1
59  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.  (MOIS):    3.07931 OPTIMISATION DU PARA1
60  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1. -->2  (MOIS):    0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
61  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2   (MOIS):    0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
62  CONS. DE CORRECTION DES TEMPERATURES(D):    0.00000 OPTIMISATION DU PARA1
63  RETENTION DE LA NEIGE                (%):    5.00000 OPTIMISATION DU PARA1


64  EVAPORATION DE LA NEIGE              (%):    0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
65  COEF. DE FONTE PAR LA PLUIE          (%):    0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
66  SEUIL DE FONTE NATURELLE          (DEG):    0.00000 OPTIMISATION DU PARA1
67  CONS  DE FONTE          (MM/DEG./JOUR):    4.00000 OPTIMISATION DU PARA1
68  FONTE PAR LE SOL      (1/10. MM/JOUR):    5.00000 OPTIMISATION DU PARA1
69  DEBIT EXTERIEUR                (M3/S):    0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
70  SURFACE DU BASSIN VERSANT       (KM2): 7.000E+02 OPTIMISATION DU PARA0
71  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES       (%): INF= -25.00000 SUP=  25.00000
72  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.      (MM)  INF=   0.00100 SUP= 200.00000
73  COEF. DE CORRECTION DE L ETP         (%). INF= -25.00000 SUP=  25.00000
74  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM). INF=   0.00100 SUP=9999.00000
75  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL       (MOIS): INF=   0.15000 SUP=   2.00000
76  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.  (MOIS)  INF=   0.15000 SUP=   5.00000
77  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1 -->2   (MOIS)  INF=   0.15000 SUP=  50.00000
78  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2   (MOIS)  INF=   0.15000 SUP=  50.00000
79  CONS. DE CORRECTION DES TEMPERATURES(D)  INF=  -3.00000 SUP=   3.00000
80  RETENTION DE LA NEIGE                (%). INF=   0.00000 SUP=  10.00000
81  EVAPORATION DE LA NEIGE              (%)  INF=   0.00000 SUP=  20.00000
82  COEF. DE FONTE PAR LA PLUIE          (%). INF= -20.00000 SUP=  20.00000
83  SEUIL DE FONTE NATURELLE          (DEG). INF=  -2.00000 SUP=   2.00000
84  CONS  DE FONTE          (MM/DEG./JOUR). INF=   1.00010 SUP=   7.00000
85  FONTE PAR LE SOL      (1/10  MM/JOUR): INF=   0.00000 SUP=  20.00000
86  ************************************************
87  ************************************************
```

TABLEAU IV.4 - Exemple avec prise en compte de la fonte de la neige

```
 1  DEBIT MENSUEL SIMULE AVEC DES PLUIES MENSUELLES * PLUSIEURS CAS ENCHAINES *
 2   2 NOMBRE DE CAS DES FICHIERS UTILISES
 3  0=DEBITS, 1=CHARGES                          : 0
 4  SEQUENCE DE VALEURS OBSERVEES                : 1
 5  STOCKAGE DES PLUIES EFFICACES                : 0
 6  STOCKAGE DES VALEURS CALCULEES               : 0
 7  IMPRESSION DU BILAN C=PAS  1=ANN  2=MEN      0
 8  ANALYSE DES PLUIES EFFICACES                 : 0
 9  ANALYSE DES VALEURS CALCULEES                . 0
10  ALLEGEMENT DU LISTING(1=ALLE 2=SUPPRIM).     2
11  DESSIN SUR IMPRIMANTE                        : 0
12  DIFFERENCE SIMULATION-OBSERVATION            : 0
13  DESSIN SUR TABLE TRAC   1=OUI, 2=DETAILS     0
14  FOURNITURE DES BORNES DES PARAMETRES         : 1
15  INTENSITE DE PONDERATION (0 1 OU 2...) . 2
16   ********** FICHIER PLUIE       **********
17         PAS DE TEMPS DES DONNEES
18     0=JOURN   1=PENTA.  2=DECA   3=MENS     : 3
19         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
20     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE             : 0
21   ********** FICHIER TEMPERATURE**********
22         PAS DE TEMPS DES DONNEES
23     0=JOURN   1=PENTA   2=DECA.  3=MENS     : 0
24         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
25     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE             : 0
26   ********** FICHIER ETP         **********
27         PAS DE TEMPS DES DONNEES
28     0=JOURN   1=PENTA   2=DECA.  3=MENS     : 3
29         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
30     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE             : 0
31   ********** FICHIER OBSERVAT.   **********
32         PAS DE TEMPS DES DONNEES
33     0=JOURN.  1=PENTA.  2=DECA.  3=MENS     : 3
34         TYPE DE FORMAT DE LECTURE
35     0= SEQUENTIEL    1= MULTIPLE             : 0
36  ************************************************
37  ************************************************
38  BASSIN NO 1 DEBIT EXEMPLE 1968/1970 AVEC CORRECTIONS DE PLUIE ET D'ETP
39  VALEUR   MAXIMALE                        :  50.00000
40  VALEUR   MINIMALE                        :   0.00100
41  LARGEUR DU DESSIN                        :  16.00000
42  HAUTEUR  DU DESSIN                       :  10.00000
43  ************************************************
44  NOMBRE ANNEES  DONNEES POUR LES ENTREES      3
45  NOMBRE ANNEES  DEMARRAGE <0 SI ABSENTES.     1
46  DATE PREMIERE ANNEE DE  SIMULATION       : 1968
47  NOMBRE ANNEES DE PREVISION               :    0
48  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES)    :    0
49  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP)       :    0
50  NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS            :   10
51  DUREE DES PLUIES EN MOY  PAR PAS (%)     :  100
52  OPTION SOUT 2 2 RES 0.1 1 RES.  3 SEUIL:     1
53  OPTION  =1  SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE      0
54  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES       (%):  -0.26599 OPTIMISATION DU PARA1
55  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.       (MM): 109.21214 OPTIMISATION DU PARA1
56  COEF. DE CORRECTION DE L ETP         (%):   8.60398 OPTIMISATION DU PARA1
57  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM)  133.68835 OPTIMISATION DU PARA1
58  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL.      (MOIS):   2.00000 OPTIMISATION DU PARA1
59  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1.  (MOIS):   3.07931 OPTIMISATION DU PARA1
60  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1. -->2  (MOIS):   0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
61  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2.  (MOIS):   0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
62  DEBIT EXTERIEUR                   (M3/S):   0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
63  SURFACE DU BASSIN VERSANT          (KM2). 7.000E+02 OPTIMISATION DU PARA0
64  COEF  DE CORRECTION DES PLUIES       (%). INF= -25.00000 SUP=  25.00000
65  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF.       (MM): INF=   0.00100 SUP= 200.00000
66  COEF. DE CORRECTION DE L ETP         (%): INF= -25.00000 SUP=  25.00000
67  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM). INF=   0.00100 SUP=9999.00000
68  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL       (MOIS)  INF=   0.15000 SUP=   2.00000
69  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1   (MOIS)  INF=   0.15000 SUP=   5.00000
70  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1 -->2   (MOIS)  INF=   0.15000 SUP=  50.00000
71  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2   (MOIS): INF=   0.15000 SUP=  50.00000
72  ************************************************
73  ************************************************
74  BASSIN NO 2 DEBIT EXEMPLE 1968/1970 SANS CORRECTIONS DE PLUIE ET ETP
75  VALEUR   MAXIMALE                        :  50.00000
76  VALEUR   MINIMALE                        :   0.00100
77  LARGEUR DU DESSIN                        :  16.00000
78  HAUTEUR  DU DESSIN                       :  10.00000
79  ************************************************
80  NOMBRE ANNEES  DONNEES POUR LES ENTREES      3
81  NOMBRE ANNEES  DEMARRAGE <0 SI ABSENTES      1
82  DATE PREMIERE ANNEE DE  SIMULATION       : 1968
83  NOMBRE ANNEES DE PREVISION                   0
84  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (PLUIES)  .     0
85  DERNIER PAS DE TEMPS OBSERVE (ETP)       .   0
86  NOMBRE MAXIMUM DES ITERATIONS            :  70
87  DUREE DES PLUIES EN MOY  PAR PAS (%)     :  100
88  OPTION SOUT 2 2 RES 0.1 1 RES   3 SEUIL      1
89  OPTION  =1  SI ETP MOYENNE CHAQUE ANNEE      0
90  COEF. DE CORRECTION DES PLUIES       (%)     0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
91  CAPACITE DE LA RESERVE SUPERF        (MM). 126.94477 OPTIMISATION DU PARA1
92  COEF  DE CORRECTION DE L ETP         (%)     0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
93  HAUTEUR DE REPARTITION RUIS-PERCOL (MM)  123.09538 OPTIMISATION DU PARA1
94  TEMPS DE DEMI-MONTEE PERCOL       (MOIS:    2.00000 OPTIMISATION DU PARA1
95  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT1   (MOIS).   2.79401 OPTIMISATION DU PARA1
96  TEMPS DE DEMI-MONTEE SOUT1 -->2   (MOIS)    0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
97  TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT SOUT2   (MOIS)    0.50000 OPTIMISATION DU PARA0
98  DEBIT EXTERIEUR                   (M3/S)    0.00000 OPTIMISATION DU PARA0
99  SURFACE DU BASSIN VERSANT          (KM2) 7.000E+02 OPTIMISATION DU PARA0
100 ************************************************
101 ************************************************
```

TABLEAU IV.5 - Pluies mensuelles, plusieurs cas enchaînés